



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
VARIASI LUASAN ORIFICE TERHADAP GAYA
REDAM, DAYA LISTRIK BANGKITAN, DAN
RESPON DINAMIS PADA *HYDRAULIC MOTOR
REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (HM RSA)**

AULIA WARDANI
NRP. 2111100076

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Harus Laksana Guntur ST, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM 141585

**MODELLING AND ANALYSIS OF ORIFICE AREA
VARIATION EFFECT TOWARDS DAMPING
FORCE, GENERATED ELECTRICITY POWER,
AND DYNAMIC RESPONSE OF HYDRAULIC
MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER
(HM RSA)**

AULIA WARDANI
NRP. 2111100076

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Harus Laksana Guntur ST, M.Eng

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI LUASAN ORIFICE TERHADAP GAYA REDAM, DAYA LISTRIK BANGKITAN, DAN RESPON DINAMIS PADA HYDRAULIC MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HM RSA)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AULIA WARDANI

Nrp. 2111 100 076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Harus Laksana G., ST, M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT (Penguji I)
NIP. 197004121997032003
3. Moch.Solichin, ST, MT. (Penguji II)
NIP. 2100201405003
4. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT (Penguji III)
NIP. 2100201405002

SURABAYA

Juli 2015

PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI LUASAN ORIFICE TERHADAP GAYA REDAM, DAYA LISTRIK BANGKITAN, DAN RESPON DINAMIS PADA *HYDRAULIC MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (HMRSA)

Nama : Aulia Wardani
NRP : 2111100076
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng

Abstrak

Menurut the official U.S. government source for fuel economy information, yakni sumber informasi resmi pemerintah USA tentang bahan bakar, menyatakan bahwa energi efektif yang mampu digunakan untuk menggerakkan kendaraan hanya sebesar 14% - 30%. Selebihnya, 68% - 72% sebagai engine losses, 4% - 6% sebagai parasitic losses, 5% - 6% sebagai drivetrain losses, dan 3% sebagai idle losses. Salah satu cara meningkatkan efisiensi energi pada mobil adalah dengan menggunakan RSA (Regenerative Shock Absorber) pada sistem suspensi kendaraan.

Sistem RSA alternatif yang dibahas pada penelitian ini yaitu menggunakan Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA). Pada tugas akhir ini, dibuat pemodelan secara teoritis, simulasi, serta analisis pengaruh variasi luasan orifice pada sistem HMRSA. Dari variasi tersebut, dipilih salah satu pasangan diameter orifice yang sesuai dengan kebutuhan untuk selanjutnya disimulasikan pada model $\frac{1}{4}$ kendaraan. Dari hasil simulasi, dianalisis perbedaan karakteristik dinamis dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan pada variasi input (sinusoidal dan bump yang dimodifikasi). Selain itu, dari kedua jenis input akan dibandingkan pula antara HMRSA dengan nilai konstanta redaman C tertentu yang dipasang pada quarter car.

Parameter simulasi sistem HMRSA ini disesuaikan dengan jurnal internasional yang telah ada. Metodologi penelitian yang digunakan yaitu studi literatur, pemodelan sistem HMRSA, maupun pemodelan sistem model ¼ kendaraan (quarter car model) dengan HMRSA. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil luasan suatu orifice maka gaya redamnya semakin besar. Selain itu, luasan orifice tidak berpengaruh pada respon kelistrikan. Dari sistem HMRSA, didapatkan nilai gaya redam ekspansi dan kompresi maksimum sebesar 6188 N dan 16590 N dengan diameter orifice 1 dan diameter orifice 2 sebesar 2 mm. Pada sistem quarter car dengan HMRSA dihasilkan respon dinamis yaitu perpindahan maksimum sebesar 0.05 m, kecepatan maksimum sebesar 0.4 m/s, percepatan maksimum sebesar 4.5 m/s² dan gaya redam maksimum sebesar 13170 N. Untuk hasil respon kelistrikan, daya listrik maksimum yang dapat dibangkitkan yaitu sebesar 100 Watt dengan arus listrik maksimum sebesar 5 A dan tegangan listrik maksimum sebesar 19.6 Volt.

Kata kunci: Regenerative Shock Absorber (RSA), pengaruh luasan orifice, gaya redam, daya listrik bangkitan, sistem suspensi, karakteristik dinamis

MODELLING AND ANALYSIS OF ORIFICE AREA VARIATION EFFECT TOWARDS DAMPING FORCE, GENERATED ELECTRICITY POWER, AND DYNAMIC RESPONSE OF HYDRAULIC MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HM RSA)

Nama : Aulia Wardani
NRP : 2111100076
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng

Abstract

The official U.S. government source for fuel economy information claims that the effective energy can be used on vehicle is just about 14% to 30%. Meanwhile, 68%-72% is used as engine losses, 4%-6% as parasitic losses, 5%-6% as drivetrain losses, and 3% as idle losses. A way to improve the energy efficiency on vehicle is using RSA (Regenerative Shock Absorber) on vehicle system suspension.

The alternative RSA system discussed on this research is Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA). In this research, the theoretical model is created and the simulation of HM RSA with analysis of orifice area variation effect is made using Simulink Matlab. By choosing one of the orifice diameter pair (orifice area variation) that suits with the requirements of the vehicle, it then simulated on quarter car model. From the simulation, the difference of dynamic response and generated electricity power that produced by the input variation (sinusoidal and bump modified) is then analyzed. Furthermore, from the input variation between HM RSA and damping constant C that assembled on vehicle is also compared.

The simulation parameter of this HM RSA system is based on existing international journal. The research methods are literature studies, modelling of HM RSA system, and modelling of

HMRSA with quarter car model. It can be found that the smaller orifice area used, the bigger damping force produced. Besides, orifice area do not influence the electricity response. The HMRSA system resulting maximum expansion and compression damping force of 6188 N and 16590 with first and second orifice diameter of 2 mm. Whereas the HMRSA assembled on quarter car model resulting dynamic responses which are maximum displacement of 0.05 m, maximum speed of 0.4 m/s, maximum acceleration of 4.5 m/s², and maximum damping force of 13170 N. For electricity response, the maximum generated electricity power is 100 Watt with maximum current of 5 A and maximum voltage of 19.6 Volt

Keywords: Regenerative Shock Absorber (RSA), orifice area effect, damping force, generated electricity power, suspension system, dynamic response

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena dengan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana atas dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Sutiyah dan Bapak Futyah, serta kedua kakak penulis Fatchy dan Nadhifa, yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam segala kondisi.
2. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur ST.,M.Eng yang selalu memberikan bimbingan dan motivasi dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Ibu Dr. Wiwiek H. ST.,MT., Bapak Moch. Solichin ST.,MT., dan Ibu Aida Annisa A.D., ST, MT sebagai dosen penguji yang telah memberikan banyak saran kepada penulis.
4. Seluruh dosen jurusan Teknik Mesin FTI ITS yang telah mendidik dan memberikan ilmu kepada penulis.
5. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir (Sawung, Aishi, dan Farida) serta Mas Tyan yang selalu membagi ilmunya.
6. Dewi Nastiti, Stevanny Chandra, Esty Wulandari, serta semua pihak yang selalu memberikan dukungan, semangat dan motivasi.

Penulis menyadari kekurangan yang ada pada Tugas Akhir ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan dan pengembangan penelitian selanjutnya. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

| | |
|---------------------|------|
| HALAMAN JUDUL | |
| LEMBAR PENGESAHAN | |
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR..... | v |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| DAFTAR SIMBOL..... | xix |

BAB I PENDAHULUAN

| | |
|---------------------------|---|
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 2 |
| 1.4 Tujuan..... | 3 |
| 1.5 Manfaat..... | 3 |

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Sistem Suspensi Regeneratif | 5 |
| 2.2 Redaman..... | 11 |
| 2.3 Motion of Base | 12 |
| 2.4 Orifice..... | 16 |
| 2.5 Motor Hidrolik | 18 |
| 2.6 Generator Listrik | 19 |
| 2.7 Sistem Hidrolik | 21 |
| 2.7.1 Persamaan Bernoulli | 21 |
| 2.7.2 <i>Head Loss</i> | 23 |
| 2.8 Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Manusia..... | 27 |

BAB III METODOLOGI

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 29 |
| 3.1.1 Studi Literatur | 30 |
| 3.2 Pemodelan dan Simulasi Dinamis Sistem HMRSA..... | 31 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1 Persamaan Gerak Sistem | 33 |
| 3.2.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem..... | 35 |
| 3.3.3 Analisis Hasil | 38 |
| 3.3 Pemodelan dan Simulasi Dinamis Sistem <i>Quarter Car</i> dengan HMRSA..... | 39 |
| 3.3.1 Persamaan Gerak Sistem | 39 |
| 3.3.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem..... | 40 |
| 3.3.3 Analisis Hasil | 42 |

BAB IV PEMODELAN SISTEM

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Pemodelan Dinamis Sistem HMRSA..... | 43 |
| 4.1.1 Pemodelan Dinamis Sistem Hidraulik | 43 |
| 4.1.2 Pemodelan Dinamis Mekanisme RSA | 47 |
| 4.2 Pemodelan Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan | 55 |
| 4.3 Pembuatan Blok Diagram..... | 57 |
| 4.3.1 Pemodelan Eksitasi Jalan | 57 |
| 4.3.2 Blok Diagram Sistem | 59 |

BAB V ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 Gaya Redam pada Silinder Hidrolik..... | 63 |
| 5.1.1 Grafik Respon Gaya Redam Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 5-3 | 65 |
| 5.1.2 Grafik Gaya Redam Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 3-1.8 | 69 |
| 5.2 Gaya Redam dan Daya Listrik Bangkitan pada HMRSA | 76 |
| 5.2.1 Grafik Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan HMRSA Variasi Luasan Orifice | 76 |
| 5.2.2 Grafik Arus, Tegangan dan Daya Listrik Bangkitan terhadap Perpindahan dan Kecepatan HMRSA Variasi Luasan Orifice..... | 79 |
| 5.3 Respon Dinamis dan Daya Listrik Bangkitan dari Aplikasi HMRSA di <i>Quarter Car</i> | 80 |
| 5.3.1 Grafik Respon Dinamis pada Bodi Kendaraan Akibat Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan..... | 80 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.2 Grafik Respon Kelistrikan pada Generator Akibat Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan | 82 |
| 5.3.3 Grafik Respon Dinamis pada Bodi Kendaraan Akibat Input Bump yang Dimodifikasi | 84 |
| 5.3.4 Grafik Respon Kelistrikan Generator Akibat Input Bump yang Dimodifikasi..... | 85 |
| 5.4 Perbandingan Respon Dinamis antara C Konvensional dengan HM RSA pada <i>Quarter Car</i> | 86 |
| 5.4.1 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Sinusoidal dengan Kecepatan Kendaraan 20 km/jam | 86 |
| 5.4.2 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Sinusoidal dengan Kecepatan Kendaraan 40 km/jam | 88 |
| 5.4.3 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Sinusoidal dengan Kecepatan Kendaraan 60 km/jam | 89 |
| 5.4.4 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Bump yang Dimodifikasi | 90 |
| 5.5 Grafik RMS (<i>Root Mean Square</i>) | 91 |
| 5.5.1 Grafik RMS Percepatan Bodi Kendaraan pada Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan | 91 |
| 5.5.2 Grafik <i>Displacement Transmissibility</i> pada Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan | 92 |
| BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN..... | 97 |
| 6.1 Kesimpulan..... | 97 |
| 6.2 Saran..... | 98 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 101 |
| LAMPIRAN | 103 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 | <i>Minor Loss Coefficient</i> untuk pintu masuk pada pipa..... | 24 |
| Tabel 2.2 | <i>Loss coefficient</i> untuk kontraksi bertahap: saluran bulat dan persegi panjang..... | 25 |
| Tabel 2.3 | <i>Representative dimensionless equivalent lengths</i> (L_e/D) untuk katup dan <i>fitting</i> | 26 |
| Tabel 3.1 | Parameter Simulasi Dinamis Sistem HMRSA | 36 |
| Tabel 3.2 | Parameter Simulasi Dinamis Sistem <i>Quarter Car Model</i> | 41 |
| Tabel 4.1 | Hasil pengujian generator pada SOC 50% | 51 |
| Tabel 4.2 | Parameter hasil linearisasi untuk simulasi dari uji eksperimen | 54 |
| Tabel 5.1 | Dimensi hidraulik yang digunakan pada simulasi | 64 |
| Tabel 5.2 | Hasil Simulasi pada Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 5-3..... | 68 |
| Tabel 5.3 | Hasil Simulasi pada Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 3-1.8..... | 73 |
| Tabel 5.4 | Hasil Simulasi pada Silinder Hidrolik dengan Frekuensi 1.5 Hz | 74 |
| Tabel 5.5 | Hasil Simulasi Grafik Respon Gaya Redam pada Variasi Diameter Orifice | 78 |
| Tabel 5.6 | Data Simulasi <i>Quarter Car</i> dan HMRSA Variasi Kecepatan Kendaraan..... | 68 |
| Tabel 5.7 | Data Simulasi <i>Quarter Car</i> dan Konstanta Redaman C Variasi Kecepatan Kendaraan | 68 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 | <i>Hydraulic Regenerative Shock Absorber</i> | 5 |
| Gambar 2.2 | Diagram Struktur <i>Regenerative Electromagnetic Shock Absorber</i> | 6 |
| Gambar 2.3 | (a) Model 3D dan Prototype <i>Shock Absorber</i> , (b) Struktur Keseluruhan <i>Shock Absorber</i> | 7 |
| Gambar 2.4 | (a) Prototype dari HESA, (b) Struktur keseluruhan dari HESA | 8 |
| Gambar 2.5 | Skema <i>Hydraulic Pumping Regenerative Suspension</i> | 9 |
| Gambar 2.6 | (a) Skema <i>hydraulic motor regenerative shock absorber</i> (HMRSA), (b) Konstruksi HMRSA... | 10 |
| Gambar 2.7 | Skema HMRSA setelah pengembangan | 11 |
| Gambar 2.8 | <i>Hysteresis loop</i> untuk material elastis | 12 |
| Gambar 2.9 | Eksitasi pada Base meliputi (a) Sistem Fisik (b) <i>Free Body Diagram</i> | 13 |
| Gambar 2.10 | Grafik <i>Displacement Transmissibility</i> Variasi (a) T_d (b) ϕ dengan r | 14 |
| Gambar 2.11 | Grafik <i>Force Transmissibility vs Frequency Ratio</i> | 16 |
| Gambar 2.12 | Geometri Orifice..... | 16 |
| Gambar 2.13 | Jenis-jenis orifice | 18 |
| Gambar 2.14 | Skema diagram elektrik pada Generator..... | 20 |
| Gambar 2.15 | Aliran pada sebuah pipa..... | 21 |
| Gambar 2.16 | <i>Loss coefficient</i> untuk aliran melalui perubahan <i>sudden area</i> | 25 |
| Gambar 2.17 | <i>Representative total resistance</i> (L_e/D) untuk (a) pipa belokan (<i>bend</i>) dan siku bergelang (<i>flanged elbow</i>) 90° dan (b) belokan <i>miter</i> (<i>miter bend</i>) | 26 |
| Gambar 2.18 | Grafik Percepatan RMS terhadap Frekuensi menurut ISO 2631 | 27 |
| Gambar 3.1 | Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir | 29 |
| Gambar 3.2 | Skema Sistem HMRSA | 31 |

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.3 | Aliran fluida saat kompresi..... | 32 |
| Gambar 3.4 | Aliran fluida saat ekspansi..... | 33 |
| Gambar 3.5 | Diagram alir pembuatan persamaan gerak sistem HMRSA | 34 |
| Gambar 3.6 | Skema untuk perhitungan fluida pada HMRSA | 35 |
| Gambar 3.7 | Diagram alir pembuatan blok simulasi sistem HMRSA | 37 |
| Gambar 3.8 | Skema <i>Quarter Car Model</i> | 39 |
| Gambar 3.9 | Diagram alir pembuatan persamaan gerak sistem <i>quarter car model</i> dengan HMRSA | 40 |
| Gambar 3.10 | Diagram alir pembuatan blok simulasi sistem <i>quarter car model</i> dengan HMRSA..... | 41 |
| Gambar 4.1 | Skema <i>Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber</i> (HMRSA) | 43 |
| Gambar 4.2 | Model mekanisme hidraulis pada HMRSA | 44 |
| Gambar 4.3 | Model sistem mekanisme <i>Regenerative Shock Absorber</i> (RSA) | 47 |
| Gambar 4.4 | <i>Free body diagram</i> roda gigi 1 | 48 |
| Gambar 4.5 | <i>Free body diagram</i> roda gigi 2 | 49 |
| Gambar 4.6 | <i>Free body diagram</i> elektrik pada generator..... | 50 |
| Gambar 4.7 | Model sistem seperempat kendaraan (<i>Quarter Car Model</i>) dengan HMRSA..... | 55 |
| Gambar 4.8 | FBD roda kendaraan | 56 |
| Gambar 4.9 | FBD bodi kendaraan | 56 |
| Gambar 4.10 | Profil Jalan Sinusoidal | 58 |
| Gambar 4.11 | Profil Jalan dengan Input Bump yang Dimodifikasi | 59 |
| Gambar 4.12 | Diagram blok Simulink secara keseluruhan dengan 2 jenis input yaitu Input Sinusoidal dan Input Bump yang Dimodifikasi | 59 |
| Gambar 4.13 | Diagram blok Simulink untuk Input Bump Modifikasi..... | 60 |
| Gambar 4.14 | Diagram blok Simulink HMRSA | 60 |
| Gambar 4.15 | Diagram blok Simulink Silinder Hidrolik..... | 61 |

| | | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.16 | Diagram blok Simulink <i>Gear System</i> | 61 |
| Gambar 4.17 | Diagram blok Simulink Torsi Elektrik | 61 |
| Gambar 4.18 | Diagram blok Simulink Kelistrikan Generator .. | 62 |
| Gambar 4.19 | Diagram blok Simulink Arus Listrik | 62 |
| Gambar 4.20 | Diagram blok Simulink Tegangan Listrik | 62 |
| Gambar 5.1 | Skema sistem Hidraulik yang terdiri dari Silinder Hidrolik dan Orifice..... | 64 |
| Gambar 5.2 | Respon Gaya Redaman terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 2 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm | 65 |
| Gambar 5.3 | Respon Gaya Redaman terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm | 66 |
| Gambar 5.4 | Respon Gaya Redaman terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 6 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm | 67 |
| Gambar 5.5 | Respon Gaya Redaman terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm dengan pasangan diameter orifice konstan sebesar 2 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm | 70 |
| Gambar 5.6 | Respon Gaya Redaman terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm | 71 |
| Gambar 5.7 | Respon Gaya Redaman terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm dengan pasangan diameter orifice 1 | |

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | konstan sebesar 6 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm..... | 72 |
| Gambar 5.8 | Grafik Gaya Redam vs Perpindahan pada Pasangan Diameter Silinder Hidrolik (a) 5 cm dan 3 cm (b) 3 cm dan 1.8 cm | 75 |
| Gambar 5.9 | Grafik respon gaya redaman terhadap perpindahan dan kecepatan pada HM RSA variasi diameter orifice 2 dengan diameter orifice 1 konstan sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm ... | 77 |
| Gambar 5.10 | Respon kelistrikan terhadap perpindahan dan kecepatan pada generator meliputi respon (a) Daya Listrik Bangkitan (b) Arus Listrik (c) Tegangan Listrik | 79 |
| Gambar 5.11 | Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal variasi kecepatan kendaraan terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redaman | 81 |
| Gambar 5.12 | Respon kelistrikan generator akibat input sinusoidal variasi kecepatan kendaraan meliputi respon (a) Daya Listrik Bangkitan (b) Arus Listrik (c) Tegangan Listrik | 83 |
| Gambar 5.13 | Respon bodi kendaraan akibat input bump modifikasi terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redaman ... | 84 |
| Gambar 5.14 | Respon kelistrikan generator akibat input bump yang dimodifikasi meliputi respon (a) Daya Listrik Bangkitan (b) Arus (c) Tegangan terhadap waktu | 85 |
| Gambar 5.15 | Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redaman | 87 |
| Gambar 5.16 | Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal dengan kecepatan kendaraan 40 km/jam terhadap | |

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redaman..... | 88 |
| Gambar 5.17 | Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redaman..... | 89 |
| Gambar 5.18 | Respon bodi kendaraan akibat input bump yang dimodifikasi terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redaman ... | 91 |
| Gambar 5.19 | Respon Percepatan RMS Bodi Kendaraan Akibat Input Sinusoidal | 92 |
| Gambar 5.20 | Grafik Perbandingan <i>Displacement Transmissibility</i> antara <i>Quarter Car</i> dengan HM RSA dan konstanta redaman C..... | 94 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem suspensi kendaraan merupakan kumpulan komponen tertentu yang berfungsi untuk meredam kejutan dan getaran yang terjadi pada kendaraan serta melindungi *chassis* kendaraan akibat permukaan jalan yang tidak rata serta dapat meningkatkan kenyamanan dan keamanan berkendara. Komponen utama dari suspensi yaitu pegas dan peredam. Secara konvensional, peredam dirancang untuk mengubah energi getaran menjadi panas untuk mengurangi getaran yang ditransmisikan dari eksitasi jalan. Panas tersebut dihasilkan dari bahan bakar kendaraan atau daya listrik yang menyebabkan banyak energi terbuang. Akibatnya, penggunaan bahan bakar kendaraan atau biasa disebut BBM menjadi tidak efektif (boros) [1]. Menurut *the official U.S. government source for fuel economy information*, yakni sumber informasi resmi pemerintah USA tentang bahan bakar menyatakan bahwa energi efektif yang mampu digunakan untuk menggerakkan kendaraan hanya sebesar 14% - 30%. Selebihnya, 68% - 72% sebagai *engine losses*, 4% - 6% sebagai *parasitic losses*, 5% - 6% sebagai *drivetrain losses*, 3% sebagai *idle losses* [2].

Faktanya, berdasarkan *blueprint Indonesia Energy Outlook* yang dikeluarkan oleh Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) RI pada tahun 2014, permintaan energi final masa mendatang masih didominasi oleh BBM. Berdasarkan Skenario BaU, permintaan energi final 2050 menjadi: BBM 40%, gas 14%, listrik 18%, batubara 20%, BBN & EBT lain 5% dan LPG 3%. Di sisi lain, sumber daya energi, khususnya minyak bumi dan gas relatif sedikit ketersediaannya. Minyak bumi dengan kapasitas sumber daya 56,6 miliar barel dan cadangan terbukti hanya 7,99% miliar barel pada beberapa tahun lalu yang diproduksi per tahun 0,36 miliar barel sehingga hanya akan bertahan selama 22 tahun lagi [3].

Berdasarkan hal tersebut, maka salah satu alternatif dari fenomena yang terjadi yaitu menggunakan *regenerative shock absorber* (RSA) yang berfungsi meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan dengan mengubah energi kinetik menjadi listrik atau cadangan energi. Energi yang disimpan digunakan untuk mendapatkan gaya redam sehingga meningkatkan performa suspensi atau meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan. Pada penelitian sebelumnya, mahasiswa ITS telah membuat salah satu jenis *regenerative shock absorber* yakni *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA). Namun, belum diketahui seberapa besar pengaruh luasan dari orifice yang digunakan terhadap respon dinamis dan energi bangkitan dari HMRSA tersebut. Oleh karena itu, dilakukan simulasi terhadap *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA) dengan variasi luasan orifice.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari tugas akhir ini yaitu:

1. Bagaimana model dinamis dari *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA) dengan variasi luasan orifice?
2. Bagaimana karakteristik gaya redam dan energi bangkitan dari *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA) dengan variasi luasan orifice?
3. Bagaimana model dinamis dari *quarter car model* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA)?
4. Bagaimana karakteristik dinamis energi bangkitan dari *quarter car model* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA)?

1.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi lingkup pembahasan tugas akhir, ditentukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Simulasi *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)* dilakukan pada sistem *quarter car model* (1/4 massa kendaraan).
2. Fluida yang bekerja pada silinder hidrolik diasumsikan *incompressible flow*.
3. Persamaan generator yang digunakan merupakan persamaan yang telah dilinearkan.
4. Spesifikasi daya maksimal generator adalah 100 watt.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini yaitu:

1. Memodelkan dan menyimulasikan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)* dengan variasi luasan orifice.
2. Mengetahui dan menganalisa karakteristik gaya redam dan energi bangkitan dari *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)* dengan variasi luasan orifice.
3. Memodelkan dan menyimulasikan *quarter car model* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)*.
4. Mengetahui dan menganalisa karakteristik dinamis dan energi bangkitan dari *quarter car model* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)*.

1.5 Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini yaitu:

1. Memberi data baru pa pemodelan dan hasil simulasi *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)* dengan variasi luasan orifice.
2. Memberi data berupa karakteristik gaya redam dan energi bangkitan yang dihasilkan oleh *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)* dengan variasi luasan orifice.
3. Memberi data berupa pemodelan dan hasil simulasi *quarter car model* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)*.

4. Memberi data berupa karakteristik gaya redam dan energi bangkitan yang dihasilkan oleh *quarter car model* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA)*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Suspensi Regeneratif

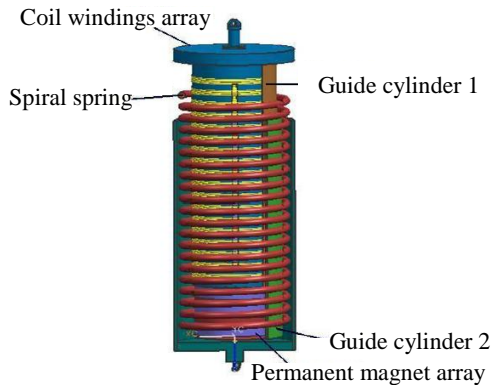
Pada tahun 2009, sekelompok mahasiswa *Massachusetts Institute of Technology* telah menciptakan *shock absorber* yang mampu menghasilkan energi listrik dengan menggunakan prinsip kerja hidrolik. Prinsip kerja sistem ini adalah ketika terjadi gerakan translasi naik turun akibat dari jalan yang bergelombang, maka mengakibatkan *rod* terdorong dan mendorong piston yang bekerja memaksa fluida untuk memutar sudu turbin. Putaran dari sudu turbin ini dihubungkan ke generator yang menghasilkan listrik. Sistem pada *shock absorber* ini diklaim lebih nyaman untuk pengendara jika dibandingkan dengan sistem *shock absorber* konvensional karena pada sistem *shock absorber* ini dikontrol oleh sebuah rangkaian elektronik aktif yang berfungsi untuk mengoptimalkan redaman. Berdasarkan hasil dari pengujian *regenerative shock absorber* ini mampu meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan hingga 10% dan mampu menghasilkan daya sebesar 200 watt [4].



Gambar 2.1 *Hydraulic Regenerative Shock Absorber*^[4]

Pada tahun 2010, Zhen Longxin dan Wei Xiaogang dari Yanshan University telah menganalisa struktur dan prinsip kerja dari *Regenerative Electromagnetic Shock Absorber*. Absorber ini menyerupai prinsip kerja dari generator linear dan dapat menghasilkan daya listrik melalui gerakan *reciprocating* relatif

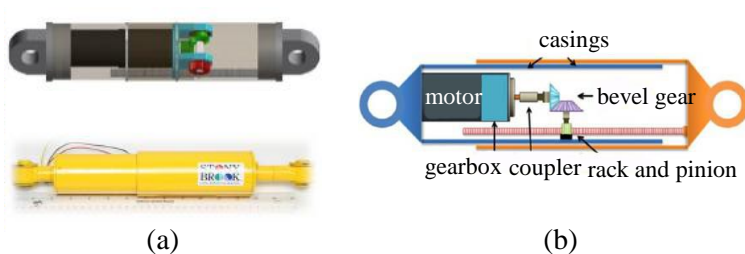
antara rakitan *coil* dan magnet permanen. Susunan magnet permanen dari *shock absorber* ini dihubungkan dengan as roda yang menyebabkan perpindahan relatif antara susunan lilitan coil dan magnet permanen. Pada tahap ini, kumpulan coil akan memotong garis induksi magnetik pada celah udara, sehingga arus akan muncul pada coil dan untuk sementara, gaya redam juga timbul pada *shock absorber*. Arah gaya redam secara relatif akan berlawanan dengan pergerakan kumpulan coil. Daya listrik yang dihasilkan dapat dipulihkan kembali melalui baterai. Analisa massa jenis aliran magnetik dari susunan magnet permanen dilakukan dengan *software* ANSYS. Hasil yang didapatkan cukup memuaskan, yaitu ketika mobil melaju dengan kecepatan 20 m/s pada jalan level c, efisiensi pemulihan mencapai 39% dan masih dapat ditingkatkan dengan pengembangan struktur, misalnya mengganti material *permeability* dengan *high permeability alloy*. Dari hasil perhitungan dan analisa magnetik, membuktikan bahwa skema dari *shock absorber* ini layak untuk diproduksi [5].



Gambar 2.2 Diagram Struktur *Regenerative Electromagnetic Shock Absorber*^[5]

Pada tahun 2010, Prof Lei Zuo dan Pei Sheng-Zang yang berasal dari *Stony Brook University* telah mendesain, memodelkan sekaligus menguji temuan mereka yaitu

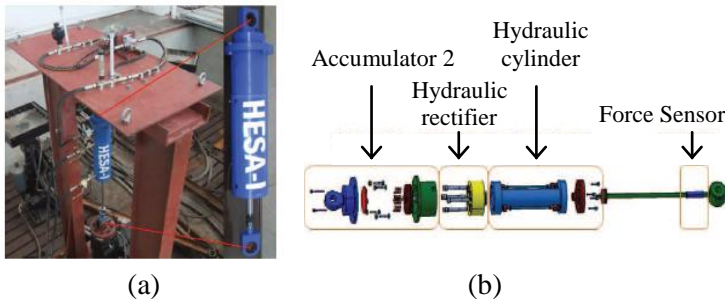
Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorber. Absorber ini terdiri dari generator permanen magnetik dan mekanisme rack-pinion yang bertujuan memanen energi dan redaman vibrasi. Mereka memanfaatkan getaran yang terjadi pada suspensi untuk menghasilkan energi listrik. Untuk menilai getaran suspensi yang diinduksi oleh kekasaran permukaan jalan, maka dilakukan pengujian dengan menggunakan Chevrolet Suburban (model 2002). Prinsip kerja dari *shock absorber* ini adalah memanfaatkan roda gigi pada sistem suspensi, sehingga menghasilkan listrik, yaitu dengan mengubah pergerakan translasi menjadi pergerakan rotasi. Pada gerakan translasi roda gigi *rack* dihubungkan dengan *spur gear*, kemudian *spur gear* akan dihubungkan dengan *bevel gear* yang mengubah gerakan translasi menjadi rotasi. Selanjutnya gerakan rotasi tersebut akan berputar menggerakkan generator. Hasil dari pengujian ini yaitu daya maksimal sebesar 68 watt dan daya rata-rata sebesar 19 watt yang diperoleh dari satu prototype shock absorber ketika kendaraan berjalan dengan kecepatan 48 km/h (30 mph) pada kondisi jalan cukup halus [6].



Gambar 2.3 (a) Model 3D dan Prototype *Shock Absorber*,
(b) Struktur Keseluruhan *Shock Absorber*^[6]

Pada tahun 2013, Zhigang Fang, dkk membuat jenis *shock absorber* baru yaitu *Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber* (HESA). Absorber ini dapat memulihkan energi dari getaran kendaraan. Frekuensi eksitasi jalan, resistensi beban, dan *damping ratio* sangat mempengaruhi pemulihan energi dari HESA tersebut. HESA terdiri dari

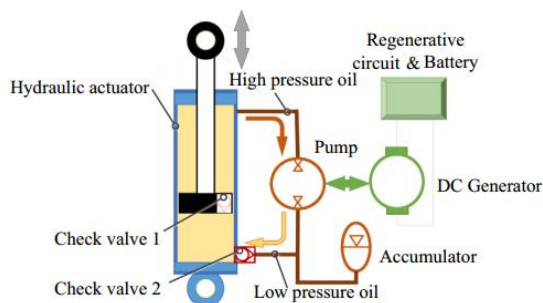
komponen *hydraulic actuator* yang dihubungkan dengan *hydraulic motor generator*. Pada sistem HESA aliran fluida dari *hydraulic* disalurkan dan diatur oleh 4 buah katup *rectifier* yang berfungsi mengatur arah aliran fluida ketika terjadi *rebound* dan *compression*. Setelah melewati katup tersebut dipasang satu buah Akumulator pada sisi saluran *inlet* motor *hydraulic (actuator)* dan satu buah pada sisi *outlet* motor *hydraulic*. Fungsi dari akumulator tersebut adalah mempengaruhi tekanan pada saluran *inlet* motor generator agar terjadi kestabilan tekanan karena fluktuasi tekanan akibat gerakan *shock absorber (HESA)*. Salah satu kesimpulan yang diperoleh dari pengujian HESA yaitu untuk setiap frekuensi eksitasi, daya *energy-recyclable* meningkat dan kemudian menurun seiring dengan *load resistance* yang meningkat secara bertahap, jadi *load resistance* optimal berubah sesuai dengan perubahan frekuensi eksitasi [7].



Gambar 2.4 (a) Prototype dari HESA, (b) Struktur keseluruhan dari HESA^[7]

Pada tahun 2014, Yuxin Zhang dkk melakukan penelitian tentang *hydraulic pumping regenerative suspension*. Pada gambar 2.5 terlihat bahwa komponen dari *hydraulic pumping regenerative suspension* ini adalah *hydraulic actuator*, *check valves*, *hydraulic accumulator*, DC generator, dan *hydraulic pump*. Cara kerjanya adalah pada saat proses kompresi, *check valve (cv)* 1 terbuka sedangkan cv 2 tertutup sehingga fluida yang

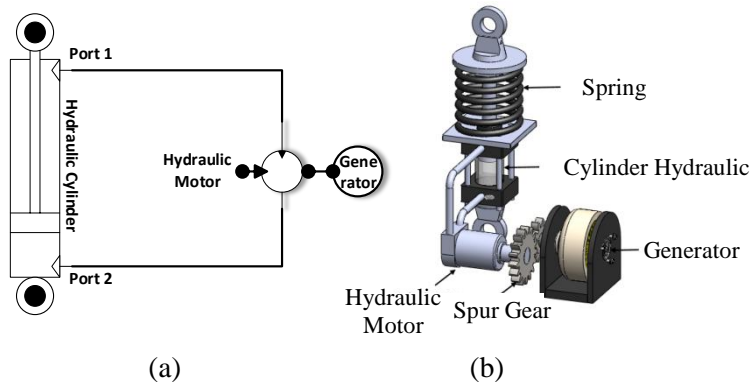
ada pada *rodless chamber* akan berpindah ke *rod chamber* melalui cv 1. Luas penampang *rod chamber* lebih kecil daripada *rodless chamber* sehingga fluida bertekanan tinggi mengalir ke pompa hidrolik kemudian menggerakkannya dan fluida bertekanan rendah yang keluar dari pompa hidrolik mengalir ke akumulator. Pada saat proses *rebound*, maka cv 1 tertutup dan cv 2 terbuka sehingga fluida bertekanan tinggi (pengaruh dorongan piston) pada *rod chamber* akan mengalir ke pompa hidrolik kemudian menggerakkannya dan fluida bertekanan rendah yang keluar dari pompa hidrolik akan mengalir ke *rodless chamber* melalui cv 2. Dengan menggunakan *GA optimization*, daya listrik yang mampu dibangkitkan sebesar 33.4 W dengan beban luar 14.7Ω , pada frekuensi 1.67 Hz, dan amplitudo 50 mm [8].



Gambar 2.5 Skema *Hydraulic Pumping Regenerative Suspension*^[8]

Pada tahun 2014, Kaspul Anuar mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember merancang *hydraulic motor regenerative shock absorber* (HM RSA). Pada gambar 2.6 terlihat bahwa komponen *hydraulic motor regenerative shock absorber* ini terdiri dari *spring*, *cylinder hydraulic*, *hydraulic motor*, *spur gear*, dan generator. Prinsip kerja dari alat ini adalah memanfaatkan energi kinetik pada gerakan suspensi kendaraan. Energi tersebut ditransfer ke sebuah motor hidrolik. Gaya yang ditransfer dari motor hidrolik kemudian ditransmisikan oleh

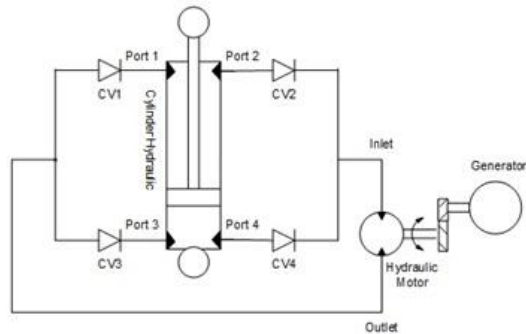
susunan roda gigi yang berfungsi untuk meningkatkan putaran generator. Putaran generator tersebut akan menghasilkan energi bangkitan. Daya listrik yang dihasilkan HMRSA ini berkisar antara 0.024 watt sampai 1.1078 watt dengan model $\frac{1}{4}$ kendaraan [9].



Gambar 2.6 (a) Skema *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA), (b) Konstruksi HMRSA^[9]

Pada tahun 2015, Chardian Bayu Prabowo mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember mengembangkan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA) rancangan mahasiswa ITS sebelumnya. Pengembangan HMRSA tersebut berupa penyesuaian putaran yang dihasilkan oleh motor hidraulik. Pada penelitian sebelumnya, putaran yang dihasilkan motor hidraulik tidak searah. Sedangkan pada penelitian ini, dengan perubahan rangkaian hidraulik dan penambahan mekanisme *check valves* maka didapatkan putaran motor yang searah. Pengembangan lainnya berupa penggantian generator agar daya yang dihasilkan HMRSA lebih besar dari hasil penelitian sebelumnya. Selanjutnya HMRSA setelah pengembangan diuji karakteristik respon dinamisnya dengan variasi frekuensi dan *accumulator*. Daya listrik yang dihasilkan HMRSA ini berkisar

antara 1.107 Watt sampai 2.332 Watt dengan model $\frac{1}{4}$ kendaraan [10].



Gambar 2.7 Skema HM RSA setelah pengembangan^[10]

2.2 Redaman

Suatu mekanisme dimana energi vibrasi secara bertahap diubah menjadi panas atau suara disebut dengan redaman. Meskipun jumlah energi yang diubah menjadi panas atau suara relatif kecil, pertimbangan akan redaman menjadi penting untuk suatu prediksi pada respon getaran suatu sistem. Dalam sistem, seringkali sebuah peredam diasumsikan tidak memiliki massa atau elastisitas. Gaya redam hanya dapat terjadi jika ada kecepatan relatif antara kedua ujung peredam. Jenis-jenis redaman antara lain:

1. *Viscous Damping*

Jenis redaman ini merupakan mekanisme redaman yang paling sering digunakan pada analisa getaran. Ketika suatu sistem mekanik bergetar pada fluida seperti udara, gas, air, atau minyak, hambatan yang diberikan oleh fluida pada *bodysistem* yang bergerak menyebabkan energi terdisipasi. Pada masalah ini, jumlah energi yang terdisipasi tergantung dari beberapa faktor seperti ukuran, bentuk, dan kecepatan *vibrating body*, viskositas fluida, dan frekuensi getaran. Pada *viscous damping*, gaya redam yang terjadi proporsional dengan kecepatan *vibrating body*.

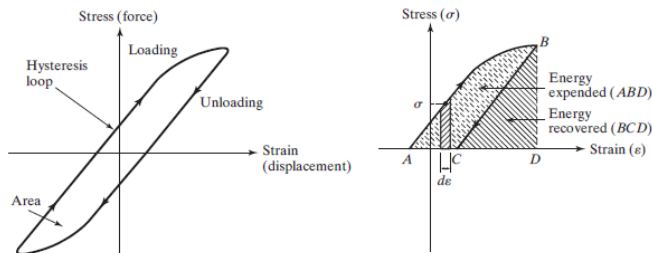
Contoh dari *viscous damping* yaitu aliran fluida di sekitar piston pada sebuah silinder dan aliran fluida yang melewati orifice.

2. Coulomb Damping

Pada jenis redaman ini, besarnya gaya redam adalah konstan tetapi berlawanan arah dengan gerakan *vibrating body*. Hal ini disebabkan adanya gesekan antara permukaan *rubbing* yang kering atau kurangnya pelumasan.

3. Hysteretic Damping

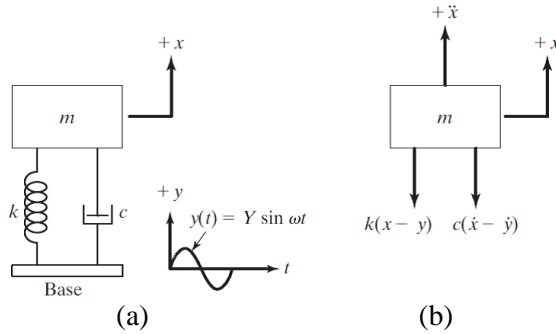
Ketika material terdeformasi, energi diserap dan terdisipasi oleh material. Efeknya disebabkan oleh gesekan antara bidang internal, dimana terjadi *slip* ketika deformasi tersebut berlangsung. Ketika suatu benda yang memiliki bahan redaman terkena getaran, diagram stress-strain menunjukkan *hysteresis loop* yang dapat dilihat pada gambar 2.8. Luasan *loop* ini menunjukkan energi yang hilang per satuan volume benda per siklus akibat *damping*.



Gambar 2.8 *Hysteresis loop* untuk material elastis^[15]

2.3 Motion of Base

Terkadang suatu *base* (landasan) dari suatu sistem suspensi mengalami suatu gerakan harmonik, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.9(a).



Gambar 2.9 Eksitasi pada Base meliputi (a) Sistem Fisik (b) *Free Body Diagram*^[15]

Eksitasi input $y(t)$ menyatakan perpindahan dari *base*, dan $x(t)$ menyatakan perpindahan massa dari posisi kesetimbangan statis pada waktu t . Maka perpanjangan dari pegas adalah $(x-y)$ dan kecepatan relatif antara kedua ujung damper adalah $(\dot{x} - \dot{y})$. Dari *free body diagram* yang ditunjukkan pada gambar 2.9, didapatkan persamaan gerak:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.1)$$

Jika $y(t) = Y \sin \omega t$, persamaan (2.1) menjadi:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= ky + c\dot{y} = kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \\ &= A \sin(\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (2.2)$$

dimana $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$ dan $\alpha = \tan^{-1} \left[-\frac{c\omega}{k} \right]$.

Hal ini menunjukkan bahwa pemberian eksitasi ke *base* setara dengan memberikan gaya harmonik sebesar A ke massa. Sehingga respon steady state dari massa, $x_p(t)$, dapat dinyatakan sebagai:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{[(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2]^{1/2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.3)$$

dimana $\phi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right]$

Menggunakan identitas trigonometri, persamaan (2.3) dapat ditulis secara lebih mudah sebagai:

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.4)$$

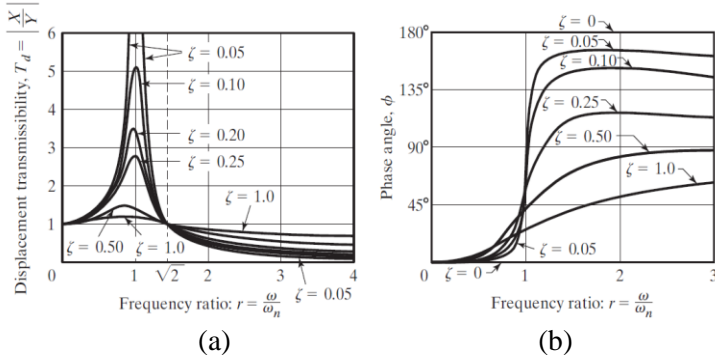
dimana X dan ϕ ditentukan oleh:

$$\frac{X}{Y} = \left[\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

dan

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{mc\omega^3}{k(k - m\omega^2) + (c\omega)^2} \right] \quad (2.6)$$

Rasio antara nilai amplitudo dari respon $x_p(t)$ dengan *base motion* $y(t)$, $\frac{X}{Y}$, disebut dengan *displacement transmissibility*. Variasi dari $\frac{X}{Y} \equiv T_d$ dan ϕ yang diberikan oleh persamaan (2.5) dan (2.6) dapat ditunjukkan oleh gambar 2.10(a) dan (b), masing-masing untuk perbedaan nilai r dan ζ .



Gambar 2.10 Grafik *Displacement Transmissibility* Variasi (a) T_d dan (b) ϕ dengan r ^[15]

Dibawah ini merupakan aspek dari *displacement transmissibility*, $T_d = \frac{X}{Y}$, yang dapat disimpulkan dari gambar 2.10(a):

1. Nilai T_d berhimpit pada nilai 1 saat $r = 0$ dan hampir berhimpit untuk nilai r yang lebih kecil.
2. Untuk *undamped system* ($\zeta=0$), $T_d \rightarrow \infty$ saat resonansi ($r = 1$).
3. Nilai T_d kurang dari 1 untuk nilai $r > \sqrt{2}$ (untuk setiap jumlah redaman ζ).
4. Nilai T_d berhimpit pada seluruh nilai ζ saat $r = \sqrt{2}$.
5. Untuk $r < \sqrt{2}$, rasio redaman yang lebih kecil menyebabkan nilai T_d yang lebih besar. Sedangkan untuk $r > \sqrt{2}$, nilai rasio redaman yang lebih kecil menyebabkan nilai T_d menjadi lebih kecil pula.
6. *Displacement transmissibility*, T_d , mencapai nilai maksimum untuk $0 < \zeta < 1$ pada rasio frekuensi $r = r_m < 1$ dimana:

$$r_m = \frac{1}{2\zeta} \left[\sqrt{1 + 8\zeta^2} - 1 \right]^{1/2}$$

Pada gambar 2.9, suatu gaya F ditransmisikan ke base atau support karena adanya reaksi antara pegas dan redaman. Gaya ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

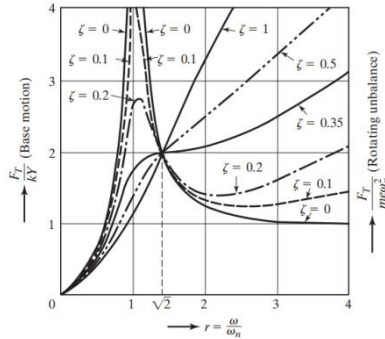
$$F = k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = -m\ddot{x} \quad (2.7)$$

$$F = m\omega^2 X \sin(\omega t - \phi) = F_t \sin(\omega t - \phi) \quad (2.8)$$

dimana F_t merupakan nilai amplitudo tertinggi yang diberikan ke base, sehingga rasio gaya *transmissibility*nya sebagai berikut :

$$\frac{F_t}{kY} = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

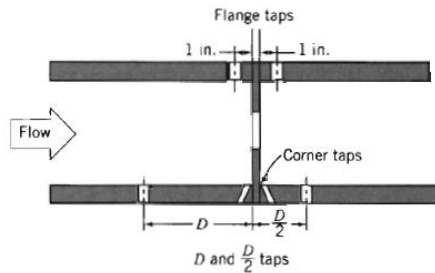
Untuk grafik *force transmissibility* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.11 Grafik Force Transmisibility vs Frequency Ratio^[15]

2.4 Orifice

Orifice merupakan suatu plat tipis yang dapat dijepit diantara flens pipa. Karena geometrinya sederhana, plat orifice sangat murah dan mudah untuk dipasang atau diganti. Prinsip kerja orifice berdasarkan fungsinya unuk mengukur laju aliran sama dengan prinsip beda tekanan atau yang biasa disebut dengan Prinsip Bernoulli bahwa terdapat hubungan antara tekanan fluida dan kecepatan fluida yaitu jika kecepatan meningkat maka tekanan akan menurun dan begitu juga sebaliknya. Fluida akan mengalir melalui pipa dan akan di lewatkan melalui lubang pada orifice yang mengakibatkan terjadinya perubahan tekanan dan kecepatan. Kerugian utama dari orifice adalah kapasitasnya yang terbatas dan head loss permanen tinggi yang disebabkan hilir ekspansi yang tidak terkontrol dari pengukur.



Gambar 2.12 Geometri orifice^[12]

Dengan terjadinya perubahan tekanan dan kecepatan pada pipa tersebut maka dapat terjadi adanya kecepatan maksimum dan tekanan minimum, hal ini biasa di sebut *Vena Contracta*. Dan setelah melewati titik temu (*vena contracta*) maka akan terjadi perubahan kecepatan dan tekanan lagi, sehingga dengan mengetahui perbedaan tekanan pada pipa normal dan tekanan pada *vena contracta* tersebut, maka dapat ditentukan persamaan Bernoulli nya dengan laju aliran volume dan masa yang didapat. Dengan menggunakan persamaan Konservasi Massa dan dengan asumsi bahwa fluida bekerja pada *incompressible flow*, maka dapat dicari nilai kecepatan fluida.

$$\int_{CS} \rho V dA = 0$$

Persamaan untuk menentukan nilai kecepatan fluida:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk persamaan Bernoulli akan dibahas pada sub bab 2.7 yaitu pada sistem hidraulis.

Adapun jenis-jenis orifice antara lain:

1. *Concentric Orifice*

Concentric Orifice merupakan jenis orifice yang paling banyak digunakan. Concentric orifice digunakan untuk *liquid* ideal atau homogen, gas dan *non viscous fluid*. Paling tepat diterapkan dalam pengukuran *custody transfer*. Profil lubang orifice ini mempunyai bevel dengan kemiringan 45° pada tepi bagian downstream. Perbandingan diameter orifice dan diameter dalam pipa dilambangkan dengan “ β ”. Orifice jenis ini memiliki ketentuan untuk nilai β yaitu antara 0.2-0.7 untuk gas dan 0.15-0.75 untuk *liquid*. Namun range yang paling baik yaitu 0.4-0.6. Apabila nilai beta ratio melebihi batas tersebut maka akurasi akan berkurang.

2. *Counter Bore Orifice*

Tipe orifice ini kurang lebih sama dengan concentric bore, namun dibagian downstream tidak dibentuk bevel melainkan tetap siku 90°. Namun diameter lubang bagian downstream lebih besar dari pada upstream.

3. Eccentric Orifice

Eccentric orifice mempunyai profil lubang yang sama dengan concentric orifice. Akan tetapi, pada eccentric orifice lubang tidak terletak tepat di tengah. Bevel pada bagian *downstream* hampir lurus (98%) dengan diameter dalam dari pipa. Eccentric bore ini digunakan untuk pengukuran aliran yang mengandung padatan atau lumpur. Digunakan juga untuk uap dan gas yang mengalami kondensasi. Instalasi eccentric bore diletakkan secara offset sebesar 180 atau 90 derajat dari bukaan eccentric. Hal ini dilakukan untuk meminimalkan masalah padatan dalam fluida.

4. Quadrant Bore Orifice

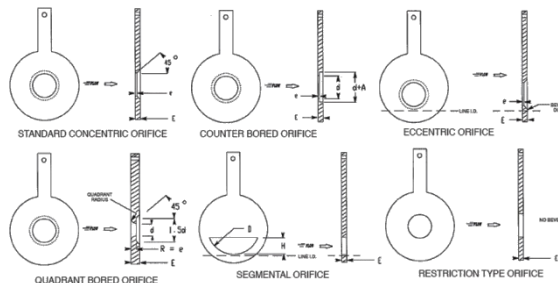
Orifice dengan spesifikasi yang merekomendasikan bilangan Reynold di bawah 1000 dengan tingkat viskositas yang tinggi.

5. Segmental Orifice

Bentuk lubang dari orifice jenis ini berbentuk huruf D terletak pada bagian bawah orifice dan digunakan untuk mengukur fluida dengan kandungan sedimen yang tinggi.

6. Restriction Orifice

Orifice yang ditujukan untuk fluida gas dimana orifice jenis ini menghasilkan *pressure drop* yang besar.



Gambar 2.13 Jenis-jenis orifice

2.5 Motor Hidrolik

Motor hidrolik merupakan sebuah aktuator mekanik yang mengkonversi aliran dan tekanan hidrolik menjadi torsi atau

tenaga putaran serta *angular displacement*. Alat ini menjadi satu bagian dari sebuah sistem hidrolik selain silinder hidrolik. Persamaan pada motor hidrolik untuk menentukan putaran motor hidrolik adalah sebagai berikut:

$$n = \frac{Q_{mh}}{q} \eta_v \quad (2.12)$$

Keterangan:

- n : Kecepatan putaran motor hidrolik (rad/s)
- Q_{mh} : Debit aliran (m^3/s)
- η_v : Efisiensi volumetrik
- q : *Displacement* motor hidrolik (cc/rev)

Sedangkan persamaan untuk menghitung torsi yang dihasilkan motor hidrolik adalah:

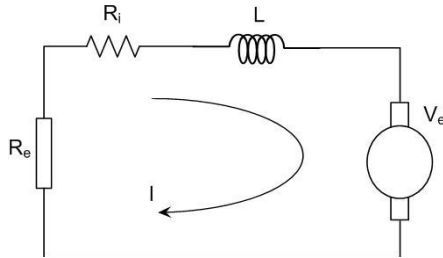
$$T_{mh} = \Delta P_{mh} \cdot q \cdot \eta_m \quad (2.13)$$

Keterangan:

- T_{mh} : Torsi Motor Hidrolik (N.m)
- ΔP_{mh} : *Pressure difference* Motor Hidrolik (N/m^2)
- η_m : Efisiensi mekanik

2.6 Generator Listrik

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya.



Gambar 2.14 Skema diagram elektrik pada Generator

Persamaan elektrik pada generator:

$$(R_e + R_i)I + L \frac{dI}{dt} = V_e \quad (2.14)$$

dimana nilai $V_e = 2NBLa \frac{d\theta}{dt} = 2NBLa\dot{\theta} = \alpha\dot{\theta}$, sehingga persamaan diatas menjadi:

$$(R_e + R_i)I + L \frac{dI}{dt} = \alpha\dot{\theta} \quad (2.15)$$

Karena induktansi diabaikan, maka:

$$I = \frac{\alpha}{(R_e + R_i)} \dot{\theta} \quad (2.16)$$

Diketahui persamaan :

$$I = \beta \dot{\theta} \quad (2.17)$$

Substitusi persamaan (2.17) dan (2.16), maka:

$$\beta = \frac{\alpha}{(R_e + R_i)} \quad (2.18)$$

Dari persamaan (2.17), dapat dicari nilai torsi elektrik (T_e) dengan persamaan:

$$\begin{aligned} T_e &= Fe \cdot a \\ &= N \cdot B \cdot l \cdot I \cdot a \\ &= NBl(\beta\dot{\theta})a \\ T_e &= C_{Te}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (2.19)$$

dimana:

V_e : *electromotive voltage* (V)

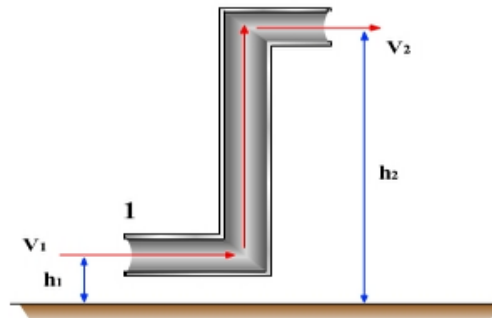
L : induktansi internal (Henries)

| | |
|-------|----------------------------|
| I | : arus (Ampere) |
| T_e | : torsi elektrik (N.m) |
| N | : jumlah lilitan |
| B | : induksi magnetik (Tesla) |
| l | : panjang kumparan (m) |
| a | : jarak terhadap kawat (m) |

2.7 Sistem Hidrolik

2.7.1 Persamaan Bernoulli

Hukum Bernoulli menjelaskan tentang konsep dasar aliran fluida, bahwa peningkatan kecepatan pada suatu aliran zat cair atau gas akan mengakibatkan penurunan tekanan pada fluida tersebut. Artinya, akan terdapat penurunan energi potensial pada aliran fluida tersebut. Konsep dasar ini berlaku pada fluida aliran termampatkan (*compressible flow*), juga pada fluida dengan aliran tak-termampatkan (*incompressible flow*). Hukum Bernoulli sebetulnya dapat dikatakan sebagai bentuk khusus dari konsep dalam mekanika fluida secara umum, yang dikenal dalam persamaan Bernoulli. Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa pada suatu aliran fluida yang tertutup, banyaknya energi suatu fluida di suatu titik sama dengan banyaknya energi di titik lain.



Gambar 2.15 Aliran pada sebuah pipa

Suatu fluida bergerak melewati pipa dari titik 1 yang ketinggiannya h_1 dari permukaan tanah ke titik 2 yang ketinggiannya h_2 dari permukaan tanah. Usaha yang dilakukan gaya F_1 pada pipa dengan luas penampang adalah:

$$W = F.s$$

sehingga didapatkan:

$$W_1 = (p_1 \cdot A_1) \cdot s = p_1 \cdot v_1 \cdot A \cdot \Delta t \quad (2.20)$$

$$W_2 = -(p_2 \cdot A_2) \cdot s = -p_2 \cdot v_2 \cdot A \cdot \Delta t \quad (2.21)$$

dimana $A_1 = A_2$ sehingga dapat dituliskan dengan A saja. W_2 bertanda (-) karena arah gaya F_2 melawan arah gerak (perpindahan) fluida. Berarti usaha bersih yang dialami fluida antara pipa dan luas penampang A_1 dan pipa dengan luas penampang A_2 adalah:

$$\begin{aligned} W_{\text{netto}} &= W_1 + W_2 \\ &= p_1 \cdot v_1 \cdot A \cdot \Delta t - p_2 \cdot v_2 \cdot A \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2.22)$$

Menurut Hukum kekekalan energi, usaha yang dilakukan oleh fluida akan memberikan tambahan energi mekanik pada fluida tersebut. Hubungan antara energi mekanik dengan usaha dapat diturunkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta E_p + \Delta E_k = (E_{p2} - E_{p1}) + (E_{k2} - E_{k1}) \\ \Delta E &= (mgh_2 - mgh_1) + \left(\frac{1}{2} (mv_2^2 - mv_1^2)\right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Oleh karena terjadinya perubahan energi mekanik fluida disebabkan oleh usaha yang dilakukan fluida, maka dari persamaan (2.22) dan persamaan (2.23) didapat:

$$\begin{aligned} W &= \Delta E \\ p_1 \cdot v_1 \cdot A \Delta t - p_2 \cdot v_2 \cdot A \cdot \Delta t &= (mgh_2 - mgh_1) + \\ &\quad \left(\frac{1}{2} (mv_2^2 - mv_1^2)\right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Telah diketahui bahwa debit aliran $A_1 v_1 = A_2 v_2$, sehingga dapat dituliskan:

$$A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t = V \quad (2.25)$$

Substitusi persamaan (2.25) ke persamaan (2.24), didapatkan:

$$p_1 V - p_2 V = (mgh_2 - mgh_1) + \left(\frac{1}{2} (mv_2^2 - mv_1^2)\right)$$

Kedua ruas kiri dan kanan dari persamaan tersebut dibagi dengan V sehingga akan didapatkan:

$$p_1 - p_2 = \frac{(mgh_2 - mgh_1) + (\frac{1}{2}(mv_2^2 - mv_1^2))}{V}$$

Massa (m) dibagi dengan Volume (V) merupakan massa jenis (ρ) sehingga:

$$p_1 - p_2 = (\rho gh_2 - \rho gh_1) + (\frac{1}{2}(\rho v_2^2 - \rho v_1^2)) \quad (2.26)$$

Persamaan (2.26) inilah yang dinamakan *Persamaan Bernoulli*. Secara umum persamaan ini dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + h_T \quad (2.27)$$

Keterangan :

- p_1 : Tekanan fluida pada kondisi 1 (N/m^2)
- p_2 : Tekanan fluida pada kondisi 2 (N/m^2)
- v_1 : Kecepatan aliran fluida pada kondisi 1 (m/s)
- v_2 : Kecepatan aliran fluida pada kondisi 2 (m/s)
- h_1 : Tinggi pipa kondisi 1 (m)
- h_2 : Tinggi pipa kondisi 2 (m)
- g : gravitasi bumi ($9.8 m/s^2$)
- h_T : *Head loss* total

2.7.2 Head Loss

Head loss adalah suatu nilai untuk mengetahui seberapa besar reduksi tekanan total (*total head*) yang diakibatkan oleh fluida saat melewati sistem aliran. *Head loss* total adalah jumlah dari *head loss mayor* (h_l) dan *head loss minor* (h_{lm}). Contoh *head loss mayor* seperti gesekan sepanjang pipa, dan contoh *head loss minor* seperti *entrances*, *fitting*, *valves*, dan perubahan penampang. Untuk menghitung *head loss* total menggunakan persamaan berikut ini.

$$h_T = h_l + h_{lm} \quad (2.28)$$

Persamaan *head loss mayor* (h_l) aliran laminar :

$$h_l = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \quad (2.29)$$

Persamaan *head loss minor* (h_{lm}) :

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2} \quad (2.30)$$

atau

$$h_{lm} = K \frac{v^2}{2} \quad (2.31)$$

Keterangan :

h_T : *Head loss* total (m)

R_e : Bilangan Reynold

L : Panjang pipa (m)

D : Diameter Pipa (m)

v : Kecepatan aliran fluida pada pipa (m/s)

f : Faktor gesekan (berdasarkan tabel)

L_e/D : Panjang ekuivalen (berdasarkan tabel)




K : Koefisien *minor loss* (berdasarkan tabel)

Berikut ini adalah penjelasan tentang fenomena yang dapat menimbulkan *minor head loss*:

➤ *Inlets dan Exits*^[13]

Jika terdapat ujung tajam pada sudut inlet, maka akan terjadi separasi aliran yang menimbulkan *vena contracta*, yang menyebabkan hilangnya *mechanical energy*. Sekalipun sudut pada *inlet* maupun *exit* di buat bulat (*rounded*), tetap terjadi fenomena *vena contracta* yang kecil. Dari tabel 2.1 dapat dilihat besarnya koefisien *head loss minor* pada beberapa bentuk *inlet / exit*.

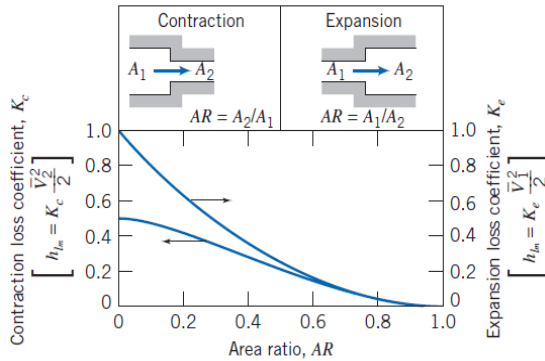
Tabel 2.1 *Minor Loss Coefficient* untuk pintu masuk pada pipa^[13]

| Entrance Type | | Minor Loss Coefficient, K^a | | | |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------|------|-------------|
| Reentrant |  | 0.78 | | | |
| Square-edged |  | 0.5 | | | |
| Rounded |  | r/D | 0.02 | 0.06 | ≥ 0.15 |
| | | K | 0.28 | 0.15 | 0.04 |

^aBased on $h_{L_e} = K(\bar{V}^2/2)$, where \bar{V} is the mean velocity in the pipe.

➤ *Enlargements dan Contractions*^[13]

Losses ini terjadi karena adanya perubahan area penampang (membesar ataupun mengecil) secara tiba-tiba. Untuk mengetahui besarnya koefisien *headloss minor*, dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Loss coefficient* untuk aliran melalui perubahan *sudden area*^[13]

Losses yang diakibatkan oleh perubahan luas penampang, dapat diantisipasi dengan cara memasang *nozzle* maupun *diffuser* diantara dua bagian dari pipa lurus yang terjadi luas perubahan penampang. Dari table 2.2 dapat ditentukan besarnya sudut dari diffuser maupun *nozzle* yang dibutuhkan.

Tabel 2.2 *Loss coefficient* untuk kontraksi bertahap: saluran bulat dan persegi panjang^[13]

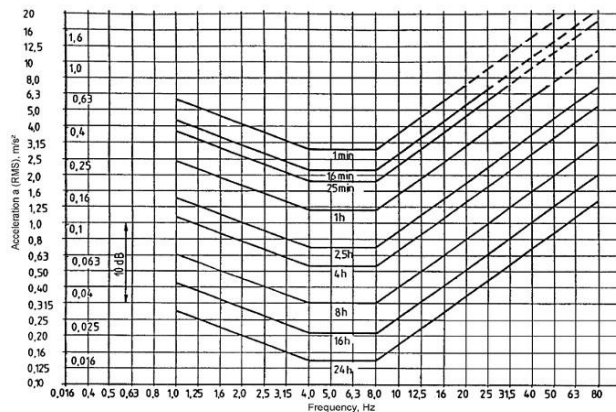
| | Included Angle, θ , Degrees | | | | | | | |
|--|------------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | A_2/A_1 | 10 | 15–40 | 50–60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| | 0.50 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.12 | 0.18 | 0.24 | 0.26 |
| | 0.25 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.17 | 0.27 | 0.35 | 0.41 |
| | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.19 | 0.29 | 0.37 | 0.43 |

Note: Coefficients are based on $h_l = K(V^2/2)$.

2.8 Pengaruh Percepatan Kendaraan Terhadap Manusia

Informasi ketahanan badan manusia terhadap percepatan merupakan hal yang sangat penting sebagai referensi dalam perancangan ketahanan bodi kendaraan terhadap *impact*. Jika pada saat kendaraan mengalami *impact* dimana pengemudi atau penumpang mendapat percepatan atau perlambatan melebihi yang mampu didukung oleh badan, maka akan dapat membahayakan pengemudi dan penumpang kendaraan tersebut.

Untuk waktu ketahanan pengendara berdasarkan besar percepatan RMS (*Root Mean Square*) menurut standart ISO 2631, ditampilkan pada gambar 2.18.

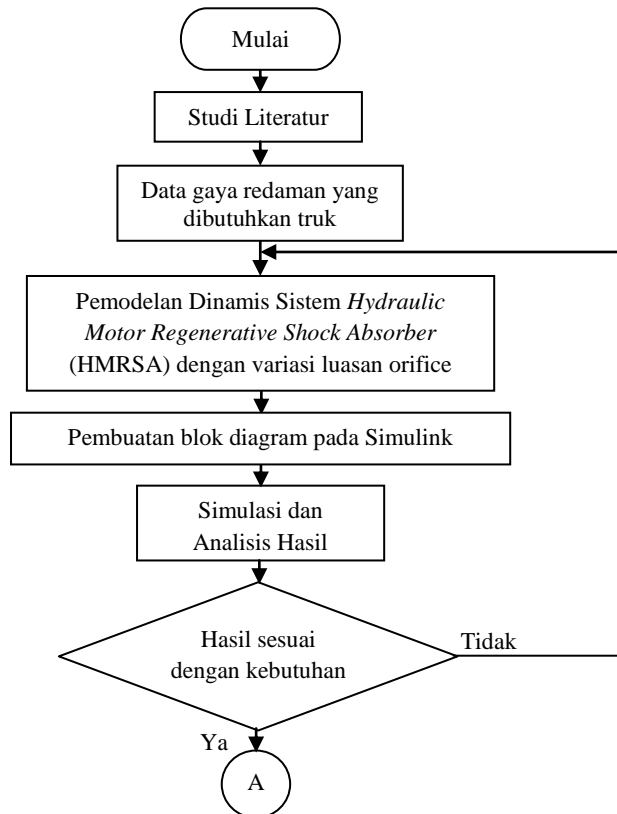


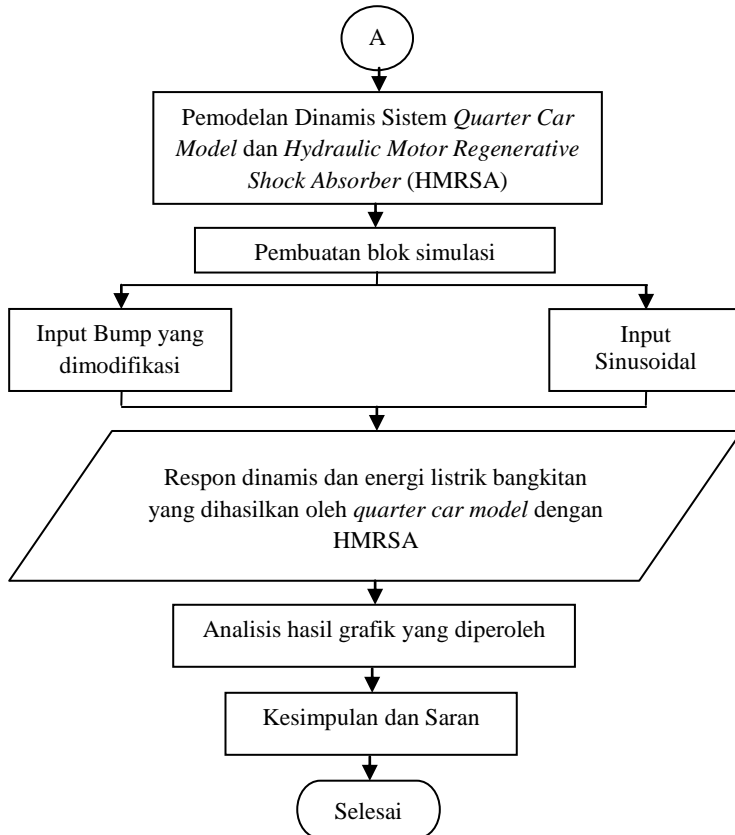
Gambar 2.18 Grafik Percepatan RMS terhadap Frekuensi menurut ISO 2631^[18]

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian Tugas Akhir ini, terdapat langkah pengujian untuk mengetahui respon dinamis dan energi bangkitan yang dihasilkan dari *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA) dengan variasi luasan orifice. Beberapa tahap dalam pengujian ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

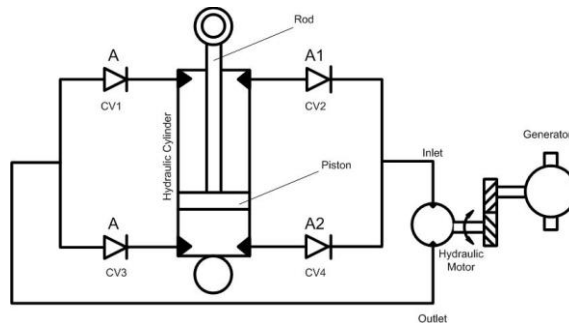
3.1.1 Studi Literatur

Sebelum dilakukan simulasi pada sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA)* dengan variasi luasan orifice, terlebih dahulu dilakukan studi literatur. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan gambaran awal tentang permasalahan/topik yang akan dibahas. Pada tahap ini, metode yang dilakukan yaitu dengan mencari berbagai referensi literatur yang sesuai dengan topik *hydraulic shock absorber*. Referensi

dari studi literatur meliputi buku, jurnal ilmiah internasional, dan penelitian-penelitian mahasiswa ITS terdahulu.

3.2 Pemodelan dan Simulasi Dinamis Sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)*

Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan pemodelan dan simulasi dinamis pada sistem *Hydraulic Regenerative Shock Absorber (HMRSA)*. Sistem HMRSA meliputi *hydraulic cylinder* dengan variasi luasan orifice, motor hidrolik, *gear*, dan generator. Skema dari sistem HMRSA dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.



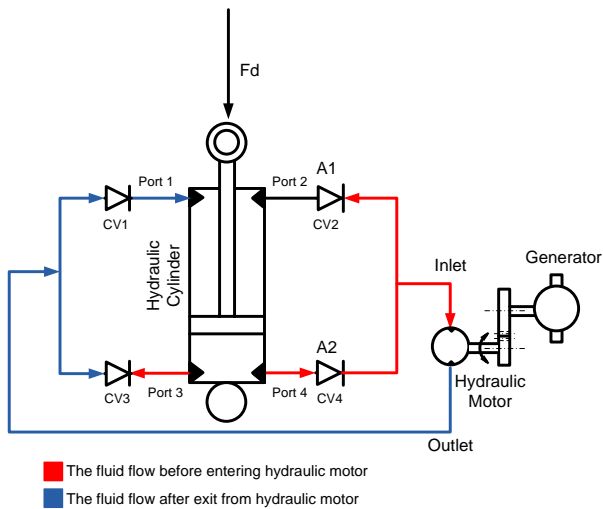
Gambar 3.2 Skema Sistem HMRSA

Pada *hydraulic cylinder*, terdapat 2 kerja yaitu kompresi dan ekspansi. Input pada sistem ini berupa eksitasi jalan bergelombang (input sinusoidal) dengan rumus:

$$Y = Y_o \sin \omega t \quad (3.1)$$

Proses kompresi dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah ini. Ketika piston bergerak kebawah (kompresi), fluida pada chamber 2 silinder hidrolik mengalir keluar melalui port 3 dan 4 menuju check valve CV3 dan CV4. Namun pada CV3, aliran tertahan karena pengaruh dari check valve yang searah sehingga aliran fluida mengalir melalui CV4 lalu masuk ke inlet motor hidrolik. Sebagian fluida mengalir ke CV2 akan tetapi tertahan

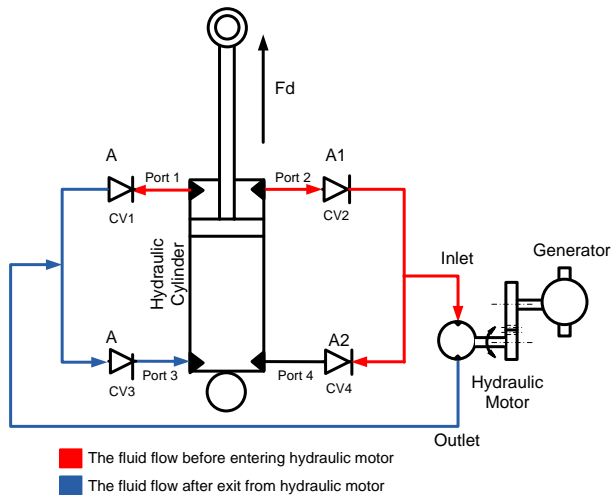
pada CV2 karena efek *check valve*. Aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik menyebabkan motor hidrolik berputar dan putaran tersebut diteruskan ke generator melalui mekanisme pasangan roda gigi. Selanjutnya, aliran fluida keluar melalui outlet motor hidrolik menuju CV1 dan CV3. Aliran fluida tidak dapat mengalir melalui CV3 karena tertahan oleh fluida yang tekanannya lebih besar yang berasal dari port 3 silinder hidrolik. Sehingga fluida mengalir ke CV1 menuju port 1 silinder hidrolik.



Gambar 3.3 Aliran fluida saat kompresi

Pada saat piston bergerak keatas (ekspansi), maka fluida yang terdapat pada silinder hidrolik keluar melalui port 1 dan port 2 menuju *check valve* CV1 dan CV2. Aliran fluida tertahan pada CV1 karena efek dari *check valve* tersebut, maka aliran fluida mengalir melalui CV2 lalu masuk ke inlet motor hidrolik. Sebagian fluida mengalir ke CV4 akan tetapi tertahan pada CV4 karena efek *check valve*. Aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik menyebabkan motor hidrolik berputar dan putaran

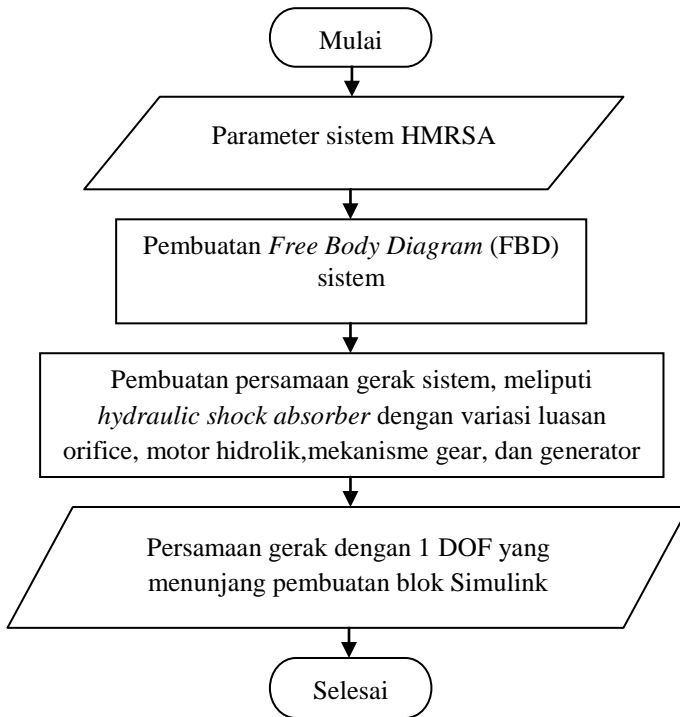
tersebut diteruskan ke generator melalui mekanisme pasangan roda gigi. Selanjutnya, aliran fluida keluar melalui outlet motor hidrolik menuju CV1 dan CV3. Aliran fluida tidak dapat mengalir melalui CV1 karena tertahan oleh fluida yang tekanannya lebih besar yang berasal dari port 1 silinder hidrolik. Sehingga fluida mengalir ke CV3 menuju port 3 silinder hidrolik.



Gambar 3.4 Aliran fluida saat ekspansi

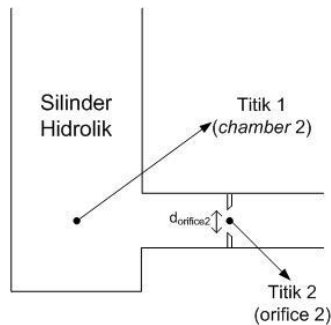
3.2.1 Persamaan Gerak Sistem

Dari pemodelan sistem yang telah dilakukan, tahap selanjutnya yaitu menentukan persamaan gerak sistem. Sistem meliputi *hydraulic cylinder* dengan variasi luasan orifice, motor hidrolik, *gear*, dan generator. Di bawah ini merupakan gambar 3.5 yang menunjukkan tahapan dalam pembuatan persamaan gerak sistem.



Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan persamaan gerak sistem HMRSA

Dalam menentukan persamaan gerak sistem, dilakukan perhitungan fluida terlebih dahulu pada silinder hidrolik terhadap orifice. Di bawah ini merupakan contoh ilustrasi / skema untuk perhitungan fluida pada HMRSA.



Gambar 3.6 Skema untuk perhitungan fluida pada HM RSA

Pada skema tersebut, *chamber 2* merupakan *chamber* fluida ketika kompresi terjadi atau dimana piston bergerak ke bawah yang menyebabkan aliran menuju port 4 untuk selanjutnya mengalir melalui orifice 2. Sedangkan d_{orifice2} merupakan diameter orifice 2 yang digunakan pada penelitian ini, dimana variasi yang digunakan meliputi 2 mm, 4 mm, dan 6 mm. Variasi tersebut juga digunakan pada orifice 1. Variasi pada orifice dilakukan karena hal tersebut merupakan salah satu cara untuk mengubah *mechanical damping* pada keseluruhan sistem. Dasar pemilihan ukuran orifice tersebut berdasarkan ukuran pipa dengan diameter dalam 1 cm, dimana ukuran diameter orifice harus lebih kecil dari diameter dalam pipa. Perbandingan diameter orifice dan diameter dalam pipa dilambangkan dengan " β ". Orifice yang digunakan memiliki ketentuan untuk nilai β yaitu 0.15-0.75 untuk *liquid*. Oleh karena itu, pemilihan ukuran orifice tersebut telah memenuhi kriteria.

3.2.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem

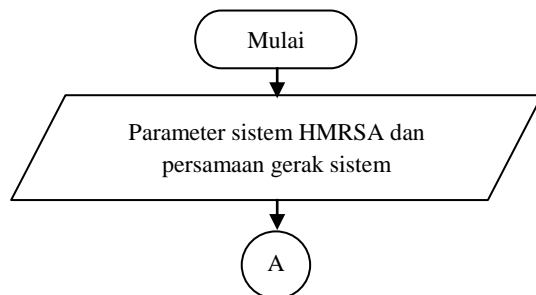
Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari pemodelan sistem, maka dibuat blok simulasi dengan bantuan *software* Simulink Matlab. Sebelum membuat blok diagram sistem, terlebih dahulu ditentukan parameter yang terkait dengan sistem HM RSA. Parameter yang dibutuhkan dalam pembuatan blok simulasi sistem dapat dilihat pada tabel 3.1.

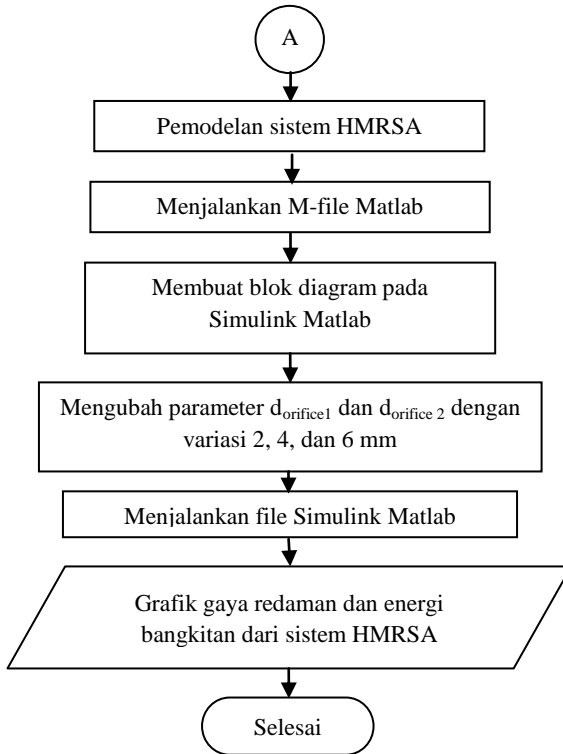
Tabel 3.1 Parameter Simulasi Dinamis Sistem HM RSA

| Keterangan Komponen | Simbol | Nilai | Satuan |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| Parameter Komponen Hidraulis | | | |
| Diameter <i>hydraulic shock absorber</i> | D | Variasi 0.05 dan 0.03 serta 0.03 dan 0.018 | m |
| Diameter orifice 1 | d_{orifice1} | Variasi 0.002, 0.004, dan 0.006 | m |
| Diameter orifice 2 | d_{orifice2} | Variasi 0.002, 0.004, dan 0.006 | m |
| Diameter pipa | Dp | 0.01 | m |
| Massa jenis fluida kerja hidraulis SAE 10W-30 | ρ | 860 | Kg/m ³ |
| Percepatan gravitasi bumi | g | 9.81 | m/s ² |
| Panjang total saluran pipa penyambung silinder hidraulis | L | 1.75 | m |
| Viskositas kinematis fluida kerja hidraulis SAE 10W-30 | v | 0.000089 | m ² /s |
| Parameter Motor Hidrolik | | | |
| Efisiensi Volumetrik | η_v | 0.88 | - |
| Efisiensi Mekanik | η_m | 0.9 | - |
| <i>Displacement</i> motor hidrolik | q | 0.0000082 | cc/rev |
| Parameter Komponen <i>Gear</i> Mekanis | | | |
| Jari-jari roda gigi lurus 1 | r_1 | 0.0575 | m |
| Jari-jari roda gigi lurus 2 | r_2 | 0.0225 | m |

| | | | |
|----------------------------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| Massa roda gigi lurus 1 | mg_1 | 0.3429 | kg |
| Massa roda gigi lurus 2 | mg_2 | 0.0582 | kg |
| Momen inersia roda gigi lurus 1 | J_1 | 0.00056685 | kg.m^2 |
| Momen inersia roda gigi lurus 2 | J_2 | 0.00001473 | kg.m^2 |
| Parameter pada Generator (hasil pengujian SOC 50%) | | | |
| Voltage | α_1 | 0.174249 | - |
| | A_1 | -10.4598 | - |
| | α_2 | 0.0061 | - |
| | A_2 | 11.4822 | - |
| Current | β | 0.003956 | - |
| | B | -0.64816 | - |
| Constant Electric Torque | C_{Te} | 9.14×10^{-4} | - |
| | ε | -0.11885 | - |

Simulasi diagram blok sistem pada dasarnya melakukan penyelesaian persamaan gerak dari pemodelan HM RSA dengan menggunakan metode *state variabel*. Saat eksekusi simulasi, digunakan 2 variasi input, yaitu bump yang dimodifikasi dan sinusoidal (harmonik) dengan variasi frekuensi yang merepresentasikan kondisi jalan tertentu. Diagram alir pembuatan blok sistem dapat dilihat pada gambar 3.7.





Gambar 3.7 Diagram alir pembuatan blok simulasi sistem HMRSA

3.2.3 Analisis Hasil

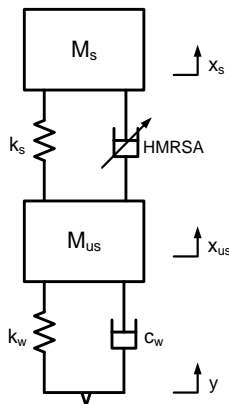
Dari pembuatan blok simulasi pada Simulink Matlab, didapatkan output data berupa grafik karakteristik dinamis serta besar daya yang dibangkitkan oleh generator pada sistem *quarter car* dengan HMRSA. Variabel HMRSA yang dianalisis adalah perbedaan hasil pada pasangan diameter silinder hidrolik tertentu dan diameter orifice tertentu.

Dari grafik, performa suspensi dianalisis dan dievaluasi. Kemudian dari analisis performa suspensi tersebut akan ditarik

kesimpulan. Kesimpulan yang dicari meliputi berapa besar energi listrik yang dapat dihasilkan pada pasangan diameter dan keadaan input, serta respon perpindahan dan kecepatan bodi sistem HMRSA terhadap simulasi input yang ditentukan.

3.3 Pemodelan dan Simulasi Dinamis Sistem *Quarter Car* dengan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA)*

Pemodelan dinamis yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu pemodelan $\frac{1}{4}$ kendaraan (*quarter car*) dengan 2 derajat kebebasan (2 DOF) tanpa HMRSA dan 3 DOF dengan HMRSA. Pemodelan *quarter car* dengan 2 DOF meliputi massa bodi kendaraan dan massa roda. Pemodelan HMRSA meliputi *hydraulic shock absorber* dengan variasi luasan orifice, *gear*, dan generator. Untuk pemodelan *quarter car* dapat dilihat pada gambar 3.8.

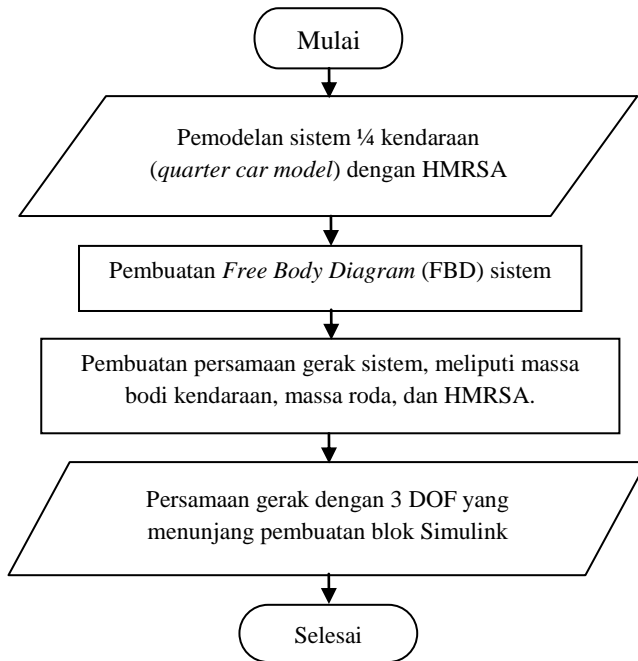


Gambar 3.8 Skema *Quarter Car Model*

3.3.1 Persamaan Gerak Sistem

Dari pemodelan sistem yang telah dilakukan, tahap selanjutnya yaitu menentukan persamaan gerak sistem secara keseluruhan. Sistem meliputi bodi mobil, roda, *hydraulic cylinder*

dengan variasi luasan orifice, motor hidrolik, *gear*, dan generator. Di bawah ini merupakan gambar 3.9 yang menunjukkan tahapan dalam pembuatan persamaan gerak sistem.



Gambar 3.9 Diagram alir persamaan gerak sistem *quarter car model* dengan HMRSA

3.3.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem

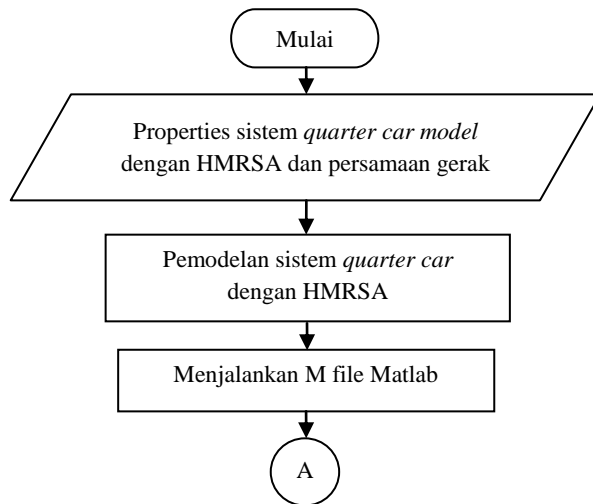
Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari pemodelan dinamis, maka dibuat blok simulasi sistem dengan bantuan *software* Simulink Matlab. Simulasi ini pada dasarnya melakukan penyelesaian persamaan gerak dari pemodelan *quarter car* dengan menggunakan metode *state variabel*. Saat eksekusi simulasi, digunakan 2 variasi input, yakni bump yang dimodifikasi dan sinusoidal (harmonik) dengan variasi frekuensi

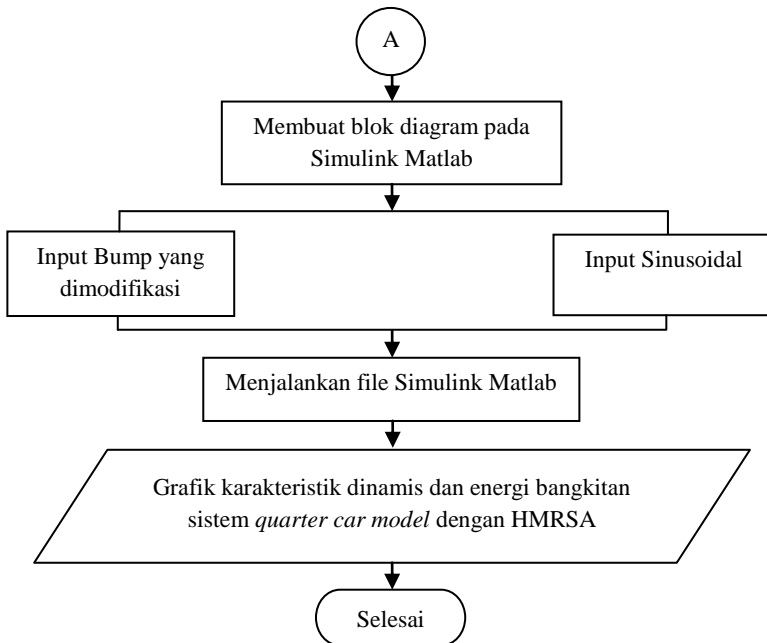
yang merepresentasikan kondisi jalan tertentu. Parameter untuk simulasi sistem *quarter car model* dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Simulasi Dinamis Sistem *Quarter Car Model*

| Parameter Model Seperempat Kendaraan | | | |
|-------------------------------------------|----------|--------|------|
| Massa bodi kendaraan (<i>sprung</i>) | M_s | 2250 | Kg |
| Massa roda (<i>unsprung</i>) | M_{us} | 200 | Kg |
| Konstanta pegas suspensi | k_s | 180000 | N/m |
| Konstanta kekakuan ban radial | k_w | 500000 | N/m |
| Konstanta redaman pada ban radial | c_w | 5000 | Ns/m |

Diagram alir pembuatan blok simulasi sistem *quarter car model* dengan HMRSA dapat ditunjukkan pada gambar 3.10 berikut.





Gambar 3.10 Diagram alir pembuatan blok simulasi sistem *quarter car model* dengan HMRSA

3.3.3 Analisis Hasil

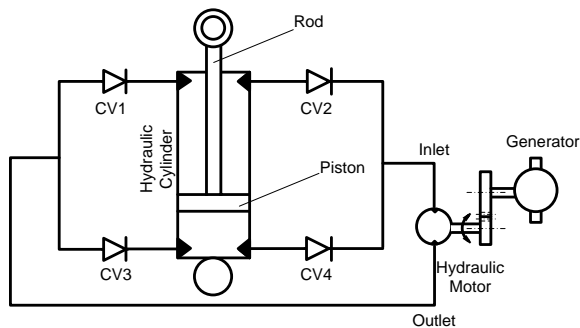
Dari pembuatan blok simulasi pada Simulink Matlab, didapatkan output data berupa grafik karakteristik dinamis serta besar daya yang dibangkitkan oleh generator pada sistem *quarter car* dengan HMRSA.

Dari grafik, performa suspensi dianalisis dan dievaluasi. Kemudian dari analisis performa suspensi tersebut akan ditarik kesimpulan. Kesimpulan yang dicari meliputi berapa besar energi listrik bangkitan yang dapat dihasilkan pada pasangan diameter dan keadaan input, serta respon dinamis bodi sistem HMRSA terhadap simulasi input yang ditentukan.

BAB IV PEMODELAN SISTEM

4.1 Pemodelan Dinamis Sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA)

Sebelum menganalisis sistem secara keseluruhan, terlebih dahulu dibuat pemodelan untuk sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA). Dalam sistem ini, pemodelan dibagi menjadi 2, yaitu pemodelan pada sistem hidraulis dan sistem *Regenerative Shock Absorber* (RSA). Adapun skema sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA) adalah sebagai berikut.

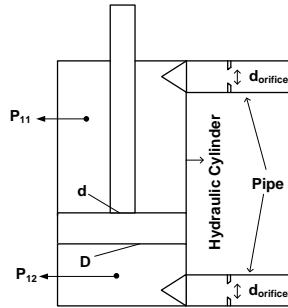


Gambar 4.1 Skema *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA)

4.1.1 Pemodelan Dinamis Sistem Hidraulis

Pada sistem HM RSA ini, digunakan mekanisme hidraulis untuk memperbesar perpindahan yang terjadi dari perpindahan suspensi antara roda dan kendaraan. Mekanisme hidraulis ini terdiri dari satu silinder hidraulis, dua *check valve*, dan dua orifice yang luasannya divariasikan. Dalam simulasi yang dilakukan, luasan orifice tersebut direpresentasikan dengan variasi diameternya. Di bawah ini merupakan skema yang digunakan

untuk menentukan persamaan yang berlaku pada mekanisme hidraulis.



Gambar 4.2 Model Mekanisme Hidraulis pada HM RSA

Persamaan yang digunakan pada mekanisme hidraulis adalah persamaan Bernoulli berikut:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gh_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gh_2 + h_T \quad (4.1)$$

Antara kedua silinder hidraulis terdapat saluran pipa yang dilalui oleh fluida kerja. Adanya pipa ini menyebabkan terjadinya *head losses*. Total *head loss* terdiri dari head loss mayor yang disebabkan oleh gaya gesek antara fluida dengan permukaan dalam pipa dan head loss minor yang disebabkan oleh adanya perubahan bentuk pipa.

$$h_T = h_l + h_{lm} \quad (4.2)$$

Persamaan *Head Loss mayor*:

$$h_l = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \quad (4.3)$$

dimana diketahui persamaan *Reynold Number*:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (4.4)$$

Persamaan *Head Loss Minor*:

$$h_{lm} = K \frac{V^2}{2} \quad (4.5)$$

dengan K adalah jumlah total nilai konstanta yang merepresentasikan perubahan bentuk pipa.

Persamaan (4.2), (4.3), (4.4) dan (4.5) lalu saling disubstitusikan untuk mendapatkan persamaan *head loss* total.

$$\begin{aligned}
 h_T &= h_l + h_{lm} \\
 h_T &= \left[\left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D_p} \frac{V_p^2}{2} \right] + K \frac{V_p^2}{2} \\
 h_T &= \left[\left(\frac{64}{V_p D_p} \right) \frac{L}{D_p} \frac{V_p^2}{2} \right] + K \frac{V_p^2}{2} \\
 h_T &= 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} \tag{4.6}
 \end{aligned}$$

Pada mekanisme hidraulis terdapat empat komponen yang memiliki diameter penampang yang berbeda, yaitu silinder hidraulis 1, saluran pipa, orifice 1 dan orifice 2. Dengan menggunakan persamaan Konservasi Massa dan dengan asumsi bahwa aliran fluida kerja merupakan *incompressible flow*, maka dapat dicari nilai kecepatan di orifice 1 dan orifice 2.

$$\int_{CS} \rho V dA = 0 \tag{4.7}$$

Persamaan untuk menentukan nilai kecepatan fluida pada orifice 1 ($V_{orifice1}$).

$$A_{11} V_{11} = A_{orifice1} V_{orifice1} \tag{4.8}$$

$$V_{orifice1} = \frac{A_{orifice1}}{A_{11}} V_{11} \tag{4.9}$$

$A_{orifice1}$ dan A_{11} dapat dicari menggunakan persamaan luasan lingkaran seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini,

$$A_{orifice1} = \frac{\pi}{4} d_{orifice1}^2 \tag{4.10}$$

$$A_{11} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \tag{4.11}$$

dimana D merupakan diameter piston dan d merupakan diameter batang piston. Sedangkan persamaan untuk menentukan nilai kecepatan fluida pada orifice 2 ($V_{orifice2}$) adalah sebagai berikut,

$$A_{12} V_{12} = A_{orifice2} V_{orifice2} \tag{4.12}$$

$$V_{orifice2} = \frac{A_{orifice2}}{A_{12}} V_{12} \tag{4.13}$$

dimana $A_{orifice2}$ dan A_{12} dapat dicari menggunakan persamaan luasan lingkaran seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$A_{orifice\ 2} = \frac{\pi}{4} d_{orifice\ 2}^2 \quad (4.14)$$

$$A_{12} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (4.15)$$

Persamaan gaya redam pada silinder hidroliis adalah sebagai berikut.

$$F = \Delta P \times A \quad (4.16)$$

Dalam silinder hidroliis, terdapat 2 gaya yang bekerja yaitu proses ekspansi dan proses kompresi. Persamaan gaya redam untuk proses ekspansi dalam silinder hidroliis.

$$\begin{aligned} \Delta P_{11} &= \frac{\rho}{2} (V_{orifice\ 1}^2 - V_{11}^2) \\ \Delta P_{11} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{11}}{A_{orifice\ 1}} V_{11})^2 - V_{11}^2) \\ \Delta P_{11} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{11}}{A_{orifice\ 1}})^2 - 1) V_{11}^2) \\ \Delta P_{11} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{11}}{A_{orifice\ 1}})^2 - 1) (\dot{x}(t))^2 \\ F_{exp} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{11}}{A_{orifice\ 1}})^2 - 1) (\dot{x}(t))^2 . A_{11} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Persamaan gaya redam untuk proses kompresi dalam silinder hidroliis.

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \frac{\rho}{2} (V_{orifice\ 2}^2 - V_{12}^2) \\ \Delta P_{12} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{12}}{A_{orifice\ 2}} V_{12})^2 - V_{12}^2) \\ \Delta P_{12} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{12}}{A_{orifice\ 2}})^2 - 1) V_{12}^2) \\ \Delta P_{12} &= \frac{\rho}{2} ((\frac{A_{12}}{A_{orifice\ 2}})^2 - 1) (\dot{x}(t))^2 \end{aligned}$$

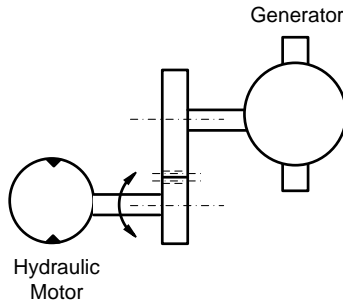
$$F_{com} = \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{12}}{A_{orifice\ 2}} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}(t))^2 \cdot A_{12} \quad (4.18)$$

Persamaan gaya redam total (F_d) untuk silinder hidrolik dan *head loss* total (h_T) dapat diperoleh dari persamaan (4.6), (4.17), dan (4.18).

$$\begin{aligned} F_d &= (F_{exp} + h_{T,exp}) + (F_{com} + h_{T,com}) \\ &= \left(\frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{11}}{A_{of\ 1}} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}(t))^2 \cdot A_{11} + 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} \right) + \\ &\quad \left(\frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{12}}{A_{of\ 2}} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}(t))^2 \cdot A_{12} + 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

4.1.2 Pemodelan Dinamis Mekanisme *Regenerative Shock Absorber* (RSA)

Dalam sistem HM RSA, selain mekanisme hidrolik terdapat satu mekanisme lagi yaitu *Regenerative Shock Absorber* (RSA). RSA terdiri dari sistem roda gigi, motor hidrolik, dan generator. Berikut ini merupakan gambar sistem untuk pemodelan dinamis mekanisme RSA.



Gambar 4.3 Model sistem mekanisme *Regenerative Shock Absorber* (RSA)

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa pada HM RSA terdapat roda gigi lurus (*spur gear*) sebanyak 1 pasang yang menimbulkan inersia dan torsi elektrik yang dihasilkan oleh

generator. Hal ini menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan pada motor hidrolik. Adapun penjelasan masing-masing sistem adalah sebagai berikut.

4.1.2.1 Motor Hidrolik

Pada motor hidrolik, persamaan yang digunakan untuk mengkonversi aliran dan tekanan hidrolik menjadi torsi dan kecepatan putaran yaitu:

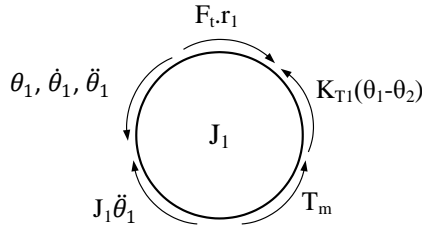
$$T_{mh} = \Delta P_{mh} \cdot q \cdot \eta_m \quad (4.20)$$

$$\omega = \frac{Q_{mh}}{q} \eta_v \quad (4.21)$$

4.1.2.2 Sistem Roda Gigi

1. Roda Gigi 1

Free body diagram pada Roda Gigi 1 ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 *Free body diagram* roda gigi 1

Persamaan gerak dari *free body diagram* tersebut:

$$\Sigma T = 0 \text{ (+CCW)}$$

$$K_{T1}(\theta_1 - \theta_2) - J_1 \ddot{\theta}_1 - F_t \cdot r_1 + T_m = 0$$

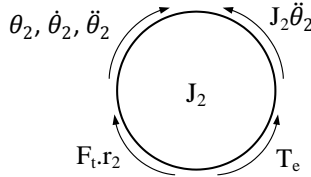
Karena poros diasumsikan pendek dan rigid, maka tidak terjadi defleksi dan menyebabkan $K_{T1} = 0$, sehingga persamaan menjadi:

$$-J_1 \ddot{\theta}_1 - F_t \cdot r_1 + T_m = 0$$

$$T_m = J_1 \ddot{\theta}_1 + F_t \cdot r_1 \quad (4.22)$$

2. Roda Gigi 2

Free body diagram pada Roda Gigi 2 ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 *Free body diagram* roda gigi 2

Persamaan gerak dari *free body diagram* tersebut,

$$\Sigma T = 0 \text{ (+CW)}$$

$$-T_e - J_2 \ddot{\theta}_2 + K_{T2}(\theta_1 - \theta_2) + F_t \cdot r_2 = 0$$

Karena poros diasumsikan pendek dan rigid, maka tidak terjadi defleksi dan menyebabkan $K_{T2}=0$, sehingga persamaan menjadi:

$$-T_e - J_2 \ddot{\theta}_2 + F_t \cdot r_2 = 0$$

$$T_e + J_2 \ddot{\theta}_2 = F_t \cdot r_2 \quad (4.23)$$

Selanjutnya substitusi F_t dari persamaan (4.23) ke persamaan (4.22),

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + \frac{r_1}{r_2} [J_2 \ddot{\theta}_2 + T_e] = T_m$$

dimana $r_1/r_2 = N$, dan $\theta_2 = (r_1/r_2)\theta_1$ sehingga didapatkan:

$$(J_1 + J_2 N^2) \ddot{\theta}_1 + T_e \cdot N = T_m \quad (4.24)$$

Untuk mendapatkan perbedaan tekanan pada motor hidrolik, substitusi persamaan (4.25) ke persamaan (4.28) dengan nilai $\dot{\theta}_1 = \omega$ dan $\ddot{\theta}_1 = \dot{\omega}$ dimana nilai Q_{mh} adalah $A\dot{x}(t)$.

$$\frac{\eta_v}{q} (J_1 + J_2 N^2) \cdot \dot{Q}_{mh} + T_e \cdot N = T_m$$

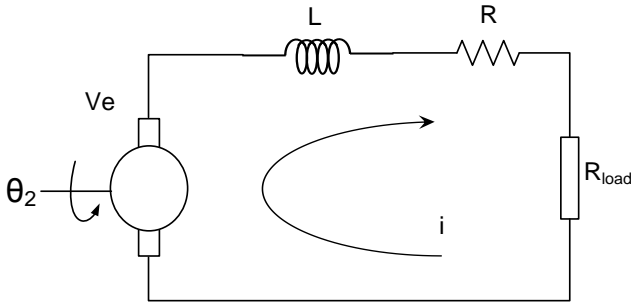
$$\frac{\eta_v}{q} (J_1 + J_2 N^2) \cdot \ddot{x}(t) + T_e \cdot N = T_m \quad (4.25)$$

Substitusi persamaan (4.25) ke persamaan (4.20), diperoleh hasil sebagai berikut.

$$\Delta P_{mh} = \frac{1}{q\eta_m} \left[\left(\frac{\eta_v A}{q} (J_1 + J_2 N^2) \cdot \ddot{x}(t) \right) + T_e \cdot N \right] \quad (4.26)$$

4.1.2.3 Generator

Free body diagram elektrik pada generator ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.6 *Free body diagram* elektrik pada generator

Dengan menggunakan Hukum Voltase Kirchoff, didapatkan persamaan elektrik generator tersebut sebagai berikut.

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + R_{Load} \cdot i = V_e \quad (4.27)$$

dimana nilai $V_e = 2NBLa \frac{d\theta}{dt} = 2NBLa\dot{\theta} = \alpha\dot{\theta}$, sehingga persamaan diatas menjadi:

$$(R + R_{load})I + L \frac{dI}{dt} = \alpha\dot{\theta} \quad (4.28)$$

Untuk mendapatkan nilai arus dari Hukum Voltase Kirchoff sebagai fungsi kecepatan, dari persamaan (4.28) dengan induktansi diabaikan dapat diturunkan perumusannya sebagai berikut.

$$I = \frac{\alpha}{(R + R_{Load})} \dot{\theta} = \beta \cdot \omega \quad (4.29)$$

dimana β adalah konstanta arus (A/rpm). Sedangkan untuk persamaan torsi elektrik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$T_e = N.B.l.a.I \quad (4.30)$$

$$T_e = N.B.l.a.(\beta.\omega) = C_{Te}\omega \quad (4.31)$$

C_{Te} adalah konstanta torsi elektrik. Untuk mendapatkan nilai konstanta pada voltase, arus, dan torsi elektrik diperlukan linierisasi dari data pada Tabel 4.1 di bawah ini. Hasil pengujian ini telah dilakukan oleh Skriptyan, mahasiswa S2 Teknik Mesin ITS.

Tabel 4.1 Hasil pengujian generator pada SOC 50%

| SOC | RPM | V _{L-L} | V _{DC} | V _{Step} U _p | I | T _e |
|---------|-----|------------------|-----------------|-------------------------------------|------|----------------|
| SOC 50% | 36 | 0.9 | 0.35 | 0.15 | 0 | 0 |
| | 55 | 1.2 | 0.8 | 0.2 | 0 | 0 |
| | 75 | 1.6 | 1.37 | 1.3 | 0 | 0 |
| | 105 | 2.1 | 2.36 | 2.12 | 0 | 0 |
| | 130 | 2.3 | 2.46 | 12.27 | 0 | 0 |
| | 185 | 3.8 | 2.8 | 12.59 | 0.12 | 0.0780 |
| | 250 | 5 | 3 | 12.93 | 0.29 | 0.1433 |
| | 370 | 7.2 | 3.7 | 13.5 | 0.57 | 0.1987 |
| | 630 | 11.9 | 7.68 | 15.3 | 1.97 | 0.4571 |

Generator yang digunakan ada simulasi kali ini menggunakan SOC (*State of Charge*) sebesar 50%. Adapun rumus linierisasi yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Linierisasi Arus

$$\frac{i - i_1}{i_2 - i_1} = \frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1}$$

$$\Delta i = \frac{i_2 - i_1}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \Delta \omega = \beta \cdot \Delta \omega \quad (4.32)$$

Dimana i_1 dan i_2 adalah arus pada kondisi pertama dan kedua, ω_1 dan ω_2 adalah kecepatan pada kondisi pertama dan kedua, dan β merupakan gradien dari arus terhadap kecepatan. Untuk mendapatkan nilai arus absolut, persamaan (4.32) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} i - i_1 &= \beta \cdot (\omega - \omega_1) \\ i &= \beta \cdot \omega + (-\beta \cdot \omega_1 + i_1) \\ i &= \beta \cdot \omega + B \end{aligned} \quad (4.33)$$

2. Linierisasi Voltase/Tegangan

Persamaan untuk mencari voltase di kondisi 1 adalah sebagai berikut.

$$V_1 = \gamma \cdot \omega_1^2 \quad (4.34)$$

Dimana nilai $\gamma = V_{peak\ 1} / \omega_{peak\ 1}^2$. $V_{peak\ 1}$ adalah nilai voltase dari hasil pengukuran ketika pada kecepatan puncak yaitu 130 rpm (kondisi 1).

Untuk mendapatkan gradien dari voltase fungsi kecepatan, didapatkan dengan cara menurunkan persamaan (4.34) terhadap *operating point* dengan perumusan sebagai berikut.

$$\alpha_1 = \left. \frac{dV_1}{d\omega_1} \right|_{\bar{\omega}_1} = 2 \cdot \gamma \cdot \bar{\omega}_1 \quad (4.35)$$

Nilai tangensial yang melewati *operating point* dimana mempunyai $(\bar{\omega}_1, \bar{V}_1)$ didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= \alpha_1 \cdot \Delta \omega_1 \\ V_1 - \bar{V}_1 &= \alpha_1 (\omega_1 - \bar{\omega}_1) \\ V_1 &= \alpha_1 \cdot \omega_1 + (-\alpha_1 \cdot \bar{\omega}_1 + \bar{V}_1) \\ V_1 &= \alpha_1 \cdot \omega_1 + A_1 \end{aligned} \quad (4.36)$$

Untuk kondisi 2 atau $\omega_2 > 130$, dengan linierisasi menggunakan rumus interpolasi didapatkan perumusan sebagai berikut.

$$\frac{V_2 - V_{21}}{V_{22} - V_{21}} = \frac{\omega_2 - \omega_{21}}{\omega_{22} - \omega_{21}}$$

$$\Delta V_2 = \frac{V_{22} - V_{21}}{\omega_{22} - \omega_{21}} \cdot \Delta \omega_2 = \alpha_2 \cdot \Delta \omega_2 \quad (4.37)$$

Dimana V_{21} dan V_{22} adalah arus pada kondisi pertama dan kedua, ω_{21} dan ω_{22} adalah kecepatan pada kondisi pertama dan kedua, dan α_2 merupakan gradien dari voltase terhadap kecepatan. Untuk mendapatkan nilai voltase absolut, persamaan (4.37) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_2 - V_{21} &= \alpha_2 \cdot (\omega_2 - \omega_{21}) \\ V_2 &= \alpha_2 \cdot \omega_2 + (-\alpha_2 \cdot \omega_{21} + V_{21}) \\ V_2 &= \alpha_2 \cdot \omega_2 + A_2 \end{aligned} \quad (4.38)$$

3. Linierisasi Torsi Elektrik

Persamaan untuk mencari linierisasi torsi elektrik adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \frac{T_e - T_{e1}}{T_{e2} - T_{e1}} &= \frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \\ \Delta T_e &= \frac{T_{e2} - T_{e1}}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \Delta \omega = C_{Te} \cdot \Delta \omega \end{aligned} \quad (4.39)$$

Dimana T_{e1} dan T_{e2} adalah torsi elektrik pada kondisi pertama dan kedua, ω_1 dan ω_2 adalah kecepatan pada kondisi pertama dan kedua, dan C_{Te} merupakan gradien dari torsi elektrik terhadap kecepatan.

Untuk mendapatkan nilai torsi elektrik absolut, persamaan (4.39) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T_e - T_{e1} &= C_{Te} \cdot (\omega - \omega_1) \\ T_e &= C_{Te} \cdot \omega + (-C_{Te} \cdot \omega_1 + T_{e1}) \\ T_e &= C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon \end{aligned} \quad (4.40)$$

Dari hasil linierisasi arus, voltase, dan torsi elektrik, didapatkan parameter – parameter untuk setiap SOC. Tabel 4.2 menunjukkan hasil linierisasi untuk SOC 50%.

Tabel 4.2 Parameter hasil linearisasi untuk simulasi dari uji eksperimen

| SOC (%) | Voltase | | | |
|---------|----------------------------|----------|----------------------|---------------|
| | $0 \leq \omega_l \leq 130$ | | $\omega_2 > 130$ | |
| | α_l | A_l | α_2 | A_2 |
| 50 | 0.174249 | -10.4598 | 0.0061 | 11.4822 |
| SOC (%) | arus | | Torsi elektrik | |
| | $\omega > 130$ | | $\omega > 130$ | |
| | β | B | C_{Te} | ε |
| 50 | 0.003956 | -0.64816 | $9.14 \cdot 10^{-4}$ | -0.11885 |

Dari penjabaran persamaan-persamaan di atas, maka dapat ditentukan besar tekanan pada motor hidrolik, dimana dengan hukum kontinuitas, *flow rate* pada motor hidrolik sama dengan *flow rate* pada silinder hidrolik ($Q_{mh} = Q_{sh}$). Sehingga, persamaan (4.26) dapat dituliskan sebagai berikut.

Untuk proses ekspansi.

$$\Delta P_{mh} = \frac{(J_1 + J_2 N^2) \cdot \eta_v \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} + \frac{(C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon) \cdot \eta_v \cdot N^2 \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} v \quad (4.41)$$

Untuk proses kompresi.

$$\Delta P_{mh} = \frac{(J_1 + J_2 N^2) \cdot \eta_v \cdot A_{12}}{\eta_m \cdot q^2} \dot{v} + \frac{(C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon) \cdot \eta_v \cdot N^2 \cdot A_{12}}{\eta_m \cdot q^2} v \quad (4.42)$$

Dari persamaan (4.19), dan (4.40), dapat dituliskan gaya redam ketika ekspansi dan kompresi sebagai berikut.

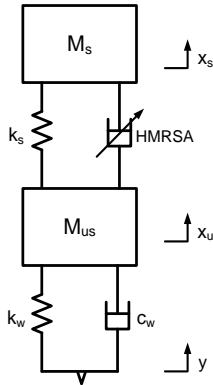
$$F_{Dexp} = \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{11}}{A_{of1}} \right)^2 - 1 \right) v^2 A_{11} + 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} + \frac{(J_1 + J_2 N^2) \cdot \eta_v \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} \dot{v} + \frac{(C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon) \cdot \eta_v \cdot N^2 \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} v \quad (4.43)$$

$$F_{Dcom} = \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{12}}{A_{of2}} \right)^2 - 1 \right) v^2 A_{12} + 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} +$$

$$\frac{(J_1 + J_2 N^2) \cdot \eta_v \cdot A_{12}}{\eta_m \cdot q^2} \dot{v} + \frac{(C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon) \cdot \eta_v \cdot N^2 \cdot A_{12}}{\eta_m \cdot q^2} v \quad (4.44)$$

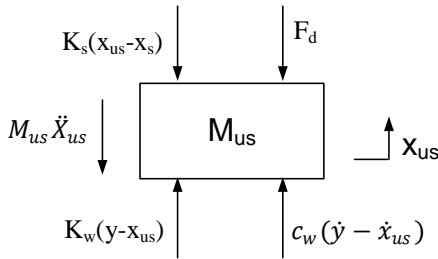
4.2 Pemodelan Dinamis Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan (*Quarter Car Model*)

Pada tugas akhir ini, sistem HMRSA akan disimulasikan pada sistem suspensi seperempat kendaraan (*Quarter Car Model*). Sistem ini terdiri dari 2 DOF, meliputi massa *sprung* atau bodi kendaraan yang dinotasikan dengan M_s dan massa *unsprung* atau roda kendaraan yang dinotasikan dengan M_{us} . Adapun pemodelan dinamis dari sistem *quarter car model* diilustrasikan pada gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Model sistem seperempat kendaraan (*Quarter Car Model*) dengan HMRSA

Dari gambar di atas, dapat dibuat *Free Body Diagram* (FBD) sebagai berikut:

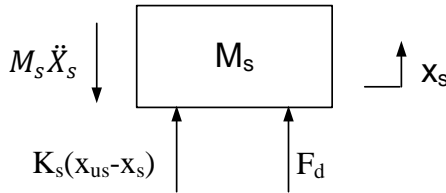


Gambar 4.8 FBD roda kendaraan

Persamaan dari *free body diagram* di atas yaitu:

$$\begin{aligned}
 M_{us} \ddot{x}_{us} - k_w(y - x_{us}) - c_w(\dot{y} - \dot{x}_{us}) + k_s(x_{us} - x_s) + Fd &= 0 \\
 \dot{x}_{us} &= v_{us} \\
 \dot{v}_{us} &= \frac{1}{M_{us}} (k_w(y - x_{us}) + c_w(\dot{y} - \dot{x}_{us}) - k_s(x_{us} - x_s) - Fd)
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

Sedangkan untuk *free body diagram* dan persamaan yang berlaku pada massa *sprung* adalah sebagai berikut.



Gambar 4.9 FBD bodi kendaraan

$$\begin{aligned}
 M_s \ddot{x}_s - k_s(x_{us} - x_s) - Fd &= 0 \\
 \dot{x}_s &= v_s \\
 \dot{v}_s &= \frac{1}{M_s} (k_s(x_{us} - x_s) + Fd)
 \end{aligned} \tag{4.46}$$

Untuk mengetahui respon terhadap bodi kendaraan, maka substitusi persamaan (4.43) dan (4.44) ke persamaan (4.46), sehingga didapatkan:

- Proses ekspansi:

$$\begin{aligned} \dot{v}_s = & \frac{1}{M_s} + k_s(x_{us} - x_s) + \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{11}}{A_{of1}} \right)^2 - 1 \right) v^2 A_{11} + \\ & 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} + \frac{(J_1 + J_2 N^2) \cdot \eta_v \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} \dot{v} + \\ & \frac{(C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon) \cdot \eta_v \cdot N^2 \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} v \end{aligned} \quad (4.47)$$

- Proses kompresi:

$$\begin{aligned} \dot{v}_s = & \frac{1}{M_s} + k_s(x_{us} - x_s) + \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_{12}}{A_{of2}} \right)^2 - 1 \right) v^2 A_{12} + \\ & 32v \frac{LV_p}{D_p^2} + K \frac{V_p^2}{2} + \frac{(J_1 + J_2 N^2) \cdot \eta_v \cdot A_{11}}{\eta_m \cdot q^2} \dot{v} + \\ & \frac{(C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon) \cdot \eta_v \cdot N^2 \cdot A_{12}}{\eta_m \cdot q^2} v \end{aligned} \quad (4.48)$$

4.3 Pembuatan Blok Diagram

Setelah melakukan pemodelan matematis dan dinamis pada sistem, maka persamaan-persamaan yang telah dirumuskan akan diubah ke dalam bentuk diagram blok pada Simulink Matlab. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan respon dinamis maupun elektrik dari sistem. Input yang digunakan yaitu input sinusoidal dengan variasi kecepatan kendaraan serta bump yang dimodifikasi.

4.3.1 Pemodelan Eksitasi Jalan

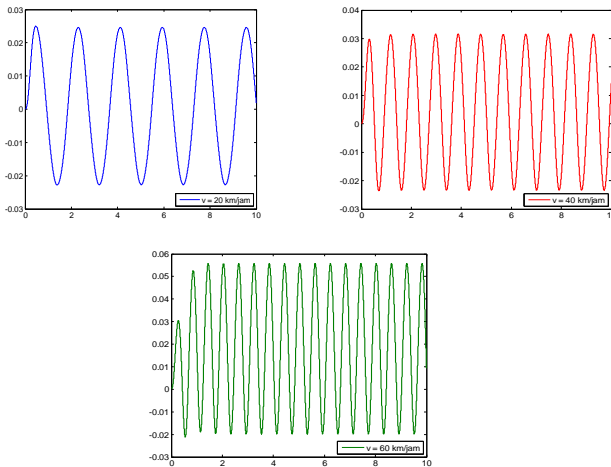
Simulasi yang dilakukan pada sistem suspensi seperempat kendaraan (*quarter car model*) dengan HMRSA ini menggunakan dua jenis input, yaitu input bump yang dimodifikasi dan input sinusoidal/harmonik variasi kecepatan kendaraan.

1. Input Sinusoidal

Kecepatan yang digunakan pada simulasi ini merepresentasikan kecepatan rendah (20 km/jam), sedang (40 km/jam), dan tinggi (60 km/jam). Untuk perhitungan frekuensi (ω) input sinusoidal digunakan rumus:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (4.49)$$

Dari perhitungan menggunakan persamaan (4.49), frekuensi pada kecepatan kendaraan 20 km/h adalah 0.55 Hz, kecepatan kendaraan 40 km/jam adalah 1.11 Hz, dan pada kecepatan kendaraan 60 km/jam adalah 1.67 Hz.

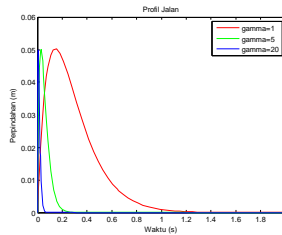


Gambar 4.10 Profil Jalan Sinusoidal

2. Input Bump yang Dimodifikasi

Sedangkan pada input bump yang telah dimodifikasi, digunakan persamaan:

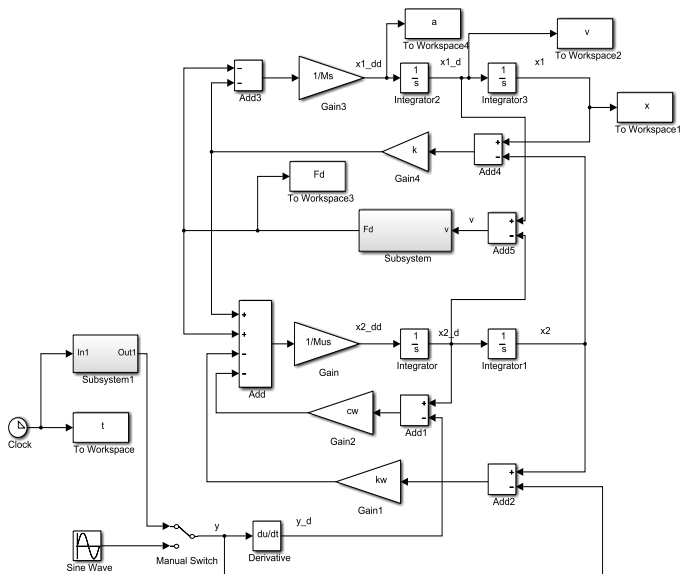
$$Z_r(t) = Z_{max} 0.37 e^2(\gamma \omega_0 t) e^{-\gamma \omega_0 t} \quad (4.50)$$



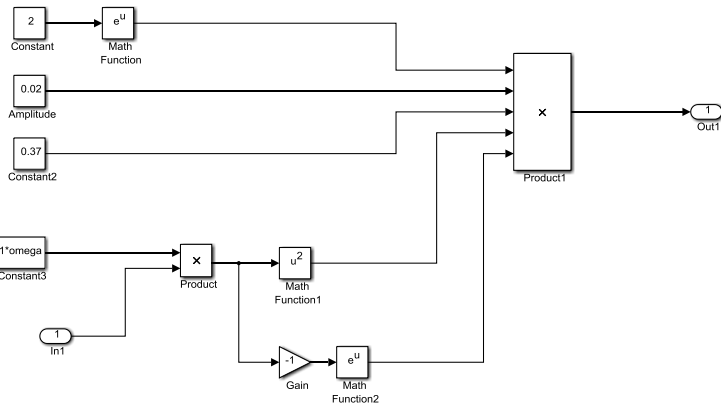
Gambar 4.11 Profil jalan dengan input *bump* yang dimodifikasi^[18]

4.3.2 Blok Diagram Sistem

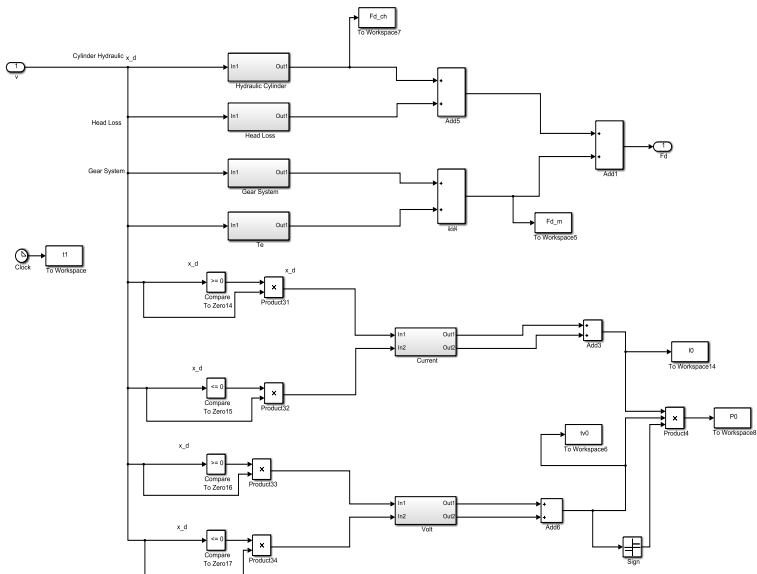
Setelah menentukan jenis eksitasi yang digunakan, dilakukan pembuatan diagram blok pada *software*. Berikut pada gambar 4.12 sampai gambar 4.20 adalah skema diagram blok yang dibuat pada Simulink Matlab.



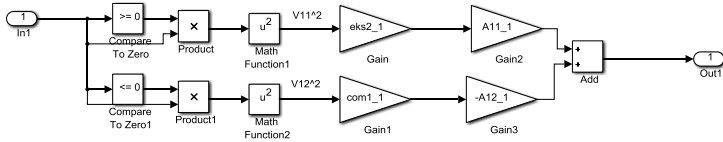
Gambar 4.12 Diagram blok Simulink secara keseluruhan dengan 2 jenis input yaitu Input Sinusoidal dan Input Bump yang Dimodifikasi



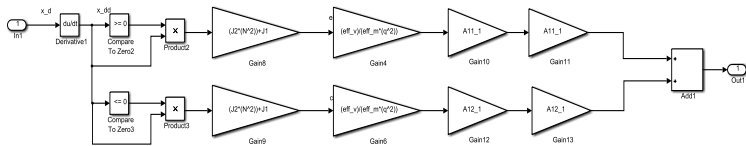
Gambar 4.13 Diagram blok Simulink untuk Input Bump Modifikasi



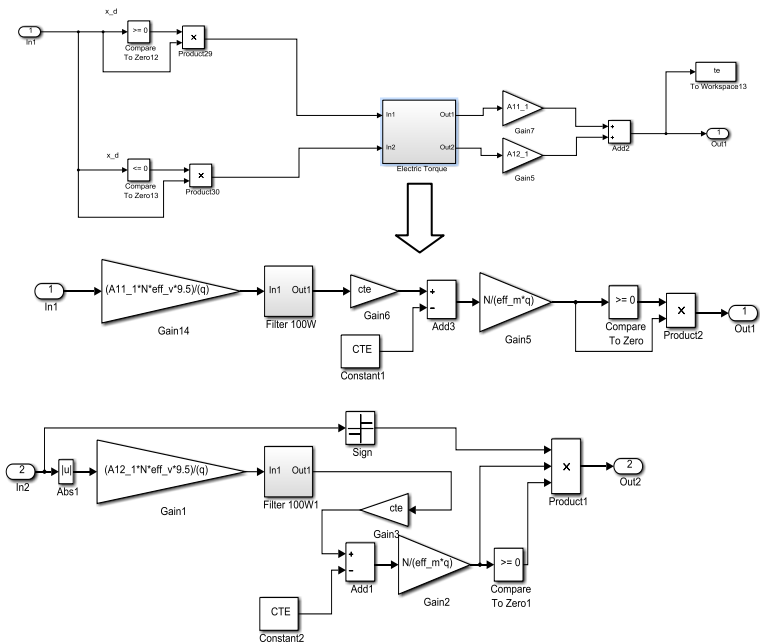
Gambar 4.14 Diagram blok Simulink HMRSA



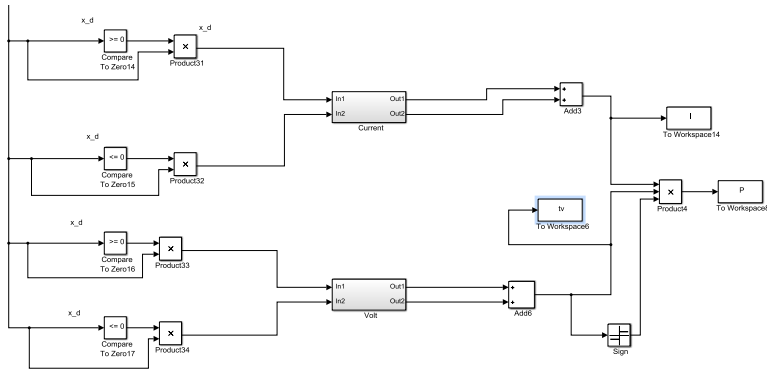
Gambar 4.15 Diagram blok Simulink Silinder Hidrolik



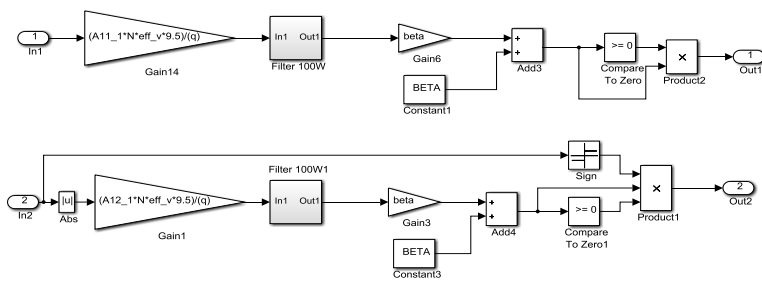
Gambar 4.16 Diagram blok Simulink Gear System



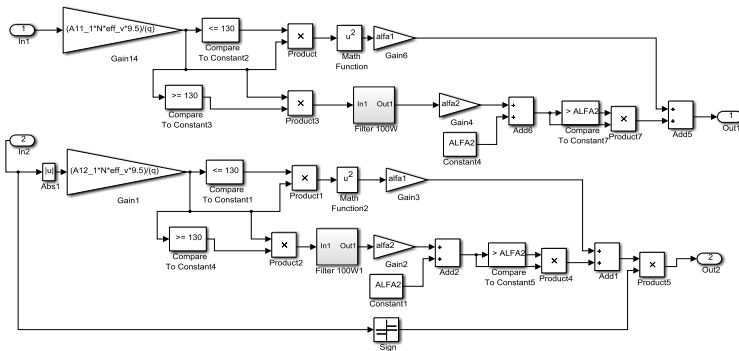
Gambar 4.17 Diagram blok Simulink Torsi Elektrik



Gambar 4.18 Diagram blok Simulink Kelistrikan Generator



Gambar 4.19 Diagram blok Simulink Arus Listrik



Gambar 4.20 Diagram blok Simulink Tegangan Listrik

BAB V

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

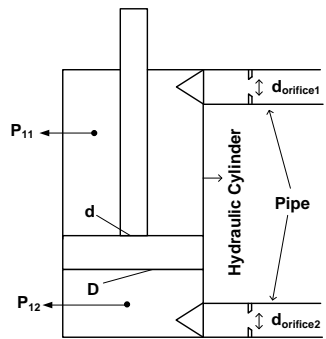
Pada simulasi pada model seperempat kendaraan (*quarter car model*) dan HMRSA, didapatkan respon getaran akibat 2 jenis input, yaitu input sinusoidal dengan variasi kecepatan kendaraan dan input bump yang dimodifikasi. Sebelum dilakukan simulasi pada keseluruhan sistem, terlebih dahulu dilakukan simulasi pada HMRSA. Adapun simulasi awal yang dilakukan yaitu simulasi pada silinder hidrolik dengan variasi frekuensi (0.5 – 2.5 Hz), variasi diameter silinder hidrolik (5 cm - 3 cm dan 3 cm - 1.8 cm), dan variasi diameter orifice (2 mm, 4 mm, dan 6 mm). Selanjutnya dilakukan simulasi pada HMRSA untuk mendapatkan gaya redam dan daya listrik bangkitan dengan variasi luasan orifice menggunakan frekuensi dan diameter silinder hidrolik yang telah dipilih dari simulasi sebelumnya. Dari simulasi tersebut, akan dipilih pasangan luasan orifice yang nantinya akan disimulasikan di *quarter car model*.

Untuk simulasi keseluruhan sistem yang terdiri dari *quarter car* dan HMRSA, akan dihasilkan respon dinamis pada kendaraan, meliputi respon perpindahan, kecepatan, percepatan, gaya redam, arus, tegangan, dan daya listrik bangkitan terhadap waktu. Dari hasil kedua input, selanjutnya akan dibandingkan dengan model *quarter car* dengan nilai C konvensional atau konstanta redaman konstan yang berasal dari jurnal internasional yang digunakan. Nilai C yang digunakan adalah sebesar 20000 Ns/m.

5.1 Gaya Redam pada Silinder Hidrolik

Sebelum menganalisis grafik gaya redam yang terjadi pada silinder hidrolik, perlu diketahui dimensi hidraulis yang digunakan pada simulasi. Skema sistem dengan dimensi hidraulis yang digunakan dapat dilihat pada gambar 5.1. Sistem hidraulis sendiri terdiri dari silinder hidrolik dan orifice. Sedangkan Tabel 5.1 merupakan tabel dimensi hidraulis yang digunakan untuk

simulasi pada silinder hidrolik. Berdasarkan tabel, dilakukan simulasi sebanyak 9 kali pada setiap pasangan diameter silinder hidrolik yang diberi input sinusoidal dengan frekuensi antara 0.5 Hz sampai 2.5 Hz.



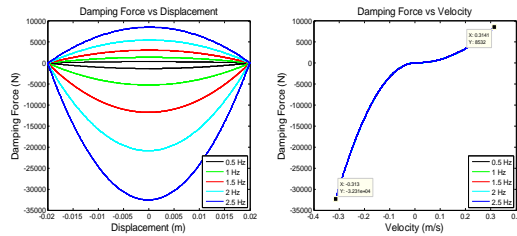
Gambar 5.1 Skema Sistem Hidraulis yang terdiri dari Silinder Hidrolik dan Orifice

Tabel 5.1 Dimensi hidraulis yang digunakan pada simulasi

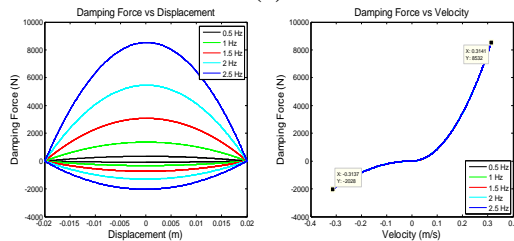
| Pasangan Diameter Silinder Hidrolik | Diameter Orifice 1 | Diameter Orifice 2 | Diameter Orifice 1 | Diameter Orifice 2 |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Variasi 1 $D = 5\text{ cm}$ $d = 3\text{ cm}$ | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| | | 4 mm | | 4 mm |
| | | 6 mm | | 6 mm |
| Variasi 2 $D = 3\text{ cm}$ $d = 1.8\text{ cm}$ | 4 mm | 2 mm | 4 mm | 2 mm |
| | | 4 mm | | 4 mm |
| | | 6 mm | | 6 mm |
| | 6 mm | 2 mm | 6 mm | 2 mm |
| | | 4 mm | | 4 mm |
| | | 6 mm | | 6 mm |

5.1.1 Grafik Respon Gaya Redam Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 5-3

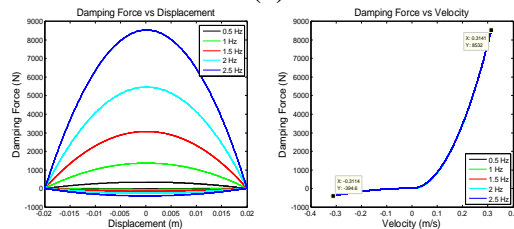
Gambar 5.2 hingga 5.4 merupakan hasil simulasi pada silinder hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm yang terdiri dari grafik gaya redam terhadap perpindahan maupun kecepatan dari massa *sprung*. Di bawah ini merupakan grafik simulasi untuk diameter orifice 1 yang disimulasikan konstan sebesar 2 mm.



(a)



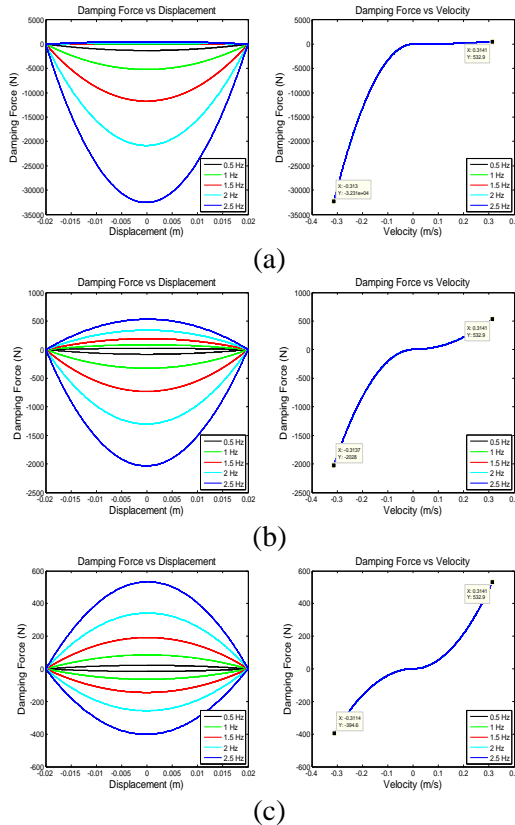
(b)



(c)

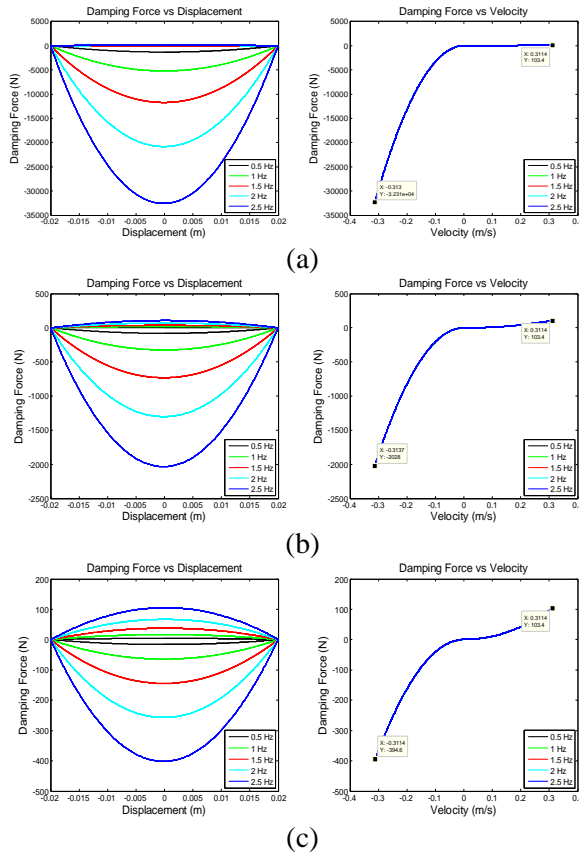
Gambar 5.2 Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 2 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Di bawah ini merupakan grafik simulasi untuk diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm.



Gambar 5.3 Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Sedangkan grafik di bawah merupakan grafik simulasi untuk diameter orifice 1 konstan sebesar 6 mm.



Gambar 5.4 Grafik Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 6 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Dapat dilihat di atas bahwa gaya redam yang terjadi pada silinder hidrolik terhadap perpindahan dari input sinusoidal memiliki *trendline* yang sama, yaitu semakin besar frekuensi inputan, maka semakin besar pula gaya redam yang dihasilkan. Hal tersebut juga berlaku pada respon gaya redam terhadap

kecepatan, dimana hanya terlihat satu warna garis saja pada grafik. Ini disebabkan karena 4 garis frekuensi lainnya memiliki titik puncak yang lebih rendah baik itu untuk proses kompresi maupun ekspansi. Titik puncak dari setiap garis frekuensi sejajar dengan titik puncak dari grafik gaya redam terhadap perpindahan.

Fenomena lainnya juga dapat dilihat pada diameter orifice 1 dan diameter orifice 2 yang memiliki rasio 1:1 yaitu 2mm-2mm, 4mm-4mm, dan 6mm-6mm, dimana pada grafik gaya redam terhadap kecepatan memiliki *trendline* yang sama. Adapun rasio gaya redam ekspansi dan kompresi maksimum dari ketiga pasangan diameter orifice memiliki hasil yang sama, yaitu 1 berbanding ± 3.75 . Untuk data simulasi selengkapnya dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 5.2 Hasil Simulasi pada Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 5-3

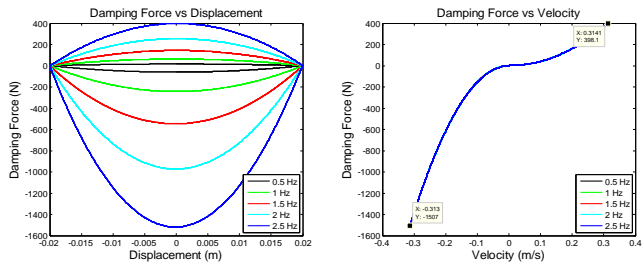
| Diameter Orifice 1 | Diameter Orifice 2 | Frekuensi (Hz) | Gaya Redam Ekspansi (N) | Gaya Redam Kompresi (N) |
|--------------------|--------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| 2 mm | 2 mm | 0.5 | 341 | 1299 |
| | | 1 | 1395 | 5170 |
| | | 1.5 | 3073 | 11720 |
| | | 2 | 5521 | 20570 |
| | | 2.5 | 8532 | 32310 |
| 4 mm | 4 mm | 0.5 | 20.3 | 77.43 |
| | | 1 | 81.08 | 309.3 |
| | | 1.5 | 196.3 | 718.1 |
| | | 2 | 337 | 1255 |
| | | 2.5 | 532.9 | 2028 |
| 6 mm | 6 mm | 0.5 | 4.007 | 15.29 |
| | | 1 | 16.1 | 65.69 |
| | | 1.5 | 37.16 | 141.8 |
| | | 2 | 68.12 | 253.9 |
| | | 2.5 | 103.4 | 394.6 |

Perlu diketahui bahwa tabel di atas merupakan hasil gaya redam maksimum dari setiap frekuensi, baik dari proses ekspansi maupun kompresi (bertanda minus pada grafik). Nilai tersebut berlaku pula pada pasangan diameter orifice berbeda. Misalnya untuk pasangan diameter orifice 2 mm dan 4 mm dengan frekuensi 1 Hz didapatkan gaya redam maksimum sebesar 1395 N dan 309.3 N. Gaya redam dipengaruhi oleh diameter piston dan batang piston pada silinder hidrolik, diameter orifice, serta frekuensi input sinusoidal.

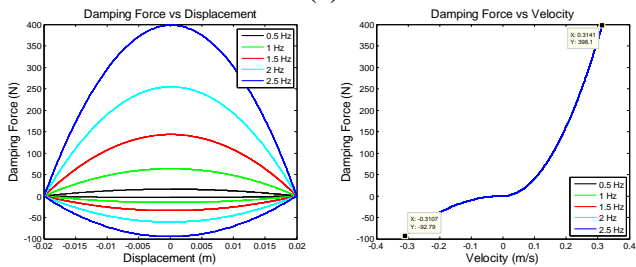
5.1.2 Grafik Respon Gaya Redam Silinder Hidrolik Pasangan Diameter 3-1.8

Grafik di bawah ini merupakan hasil simulasi pada silinder hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm yang terdiri dari grafik gaya redam terhadap perpindahan maupun kecepatan dari massa *sprung*. Gambar 5.5 adalah grafik simulasi untuk diameter orifice 1 konstan sebesar 2 mm, diikuti dengan gambar 5.6 yang merupakan grafik simulasi untuk diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm. Sedangkan gambar 5.7 merupakan grafik simulasi untuk diameter orifice 1 konstan sebesar 6 mm.

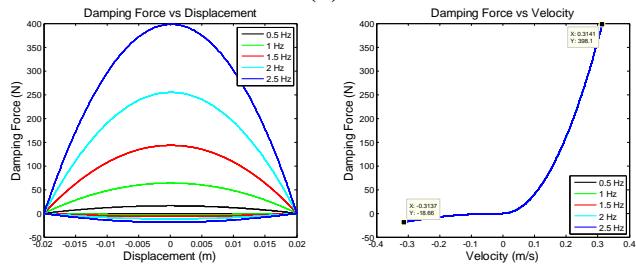
Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan. Grafik tersebut memiliki *trendline* yang serupa dengan pasangan diameter silinder hidrolik 5 cm dan 3 cm, yaitu semakin besar frekuensi inputan, maka semakin besar pula gaya redam yang dihasilkan. Hal tersebut juga berlaku pada grafik respon gaya redam terhadap kecepatan. Namun pada grafik tersebut, tidak terlihat perbedaan variasi frekuensi dikarenakan grafik frekuensi 0.5-2 Hz berhimpit dan bernilai lebih kecil daripada grafik frekuensi 2.5 Hz. Tabel 5.3 merupakan tabel hasil simulasi untuk gaya redam maksimum pada masing-masing proses ekspansi maupun kompresi secara keseluruhan.



(a)

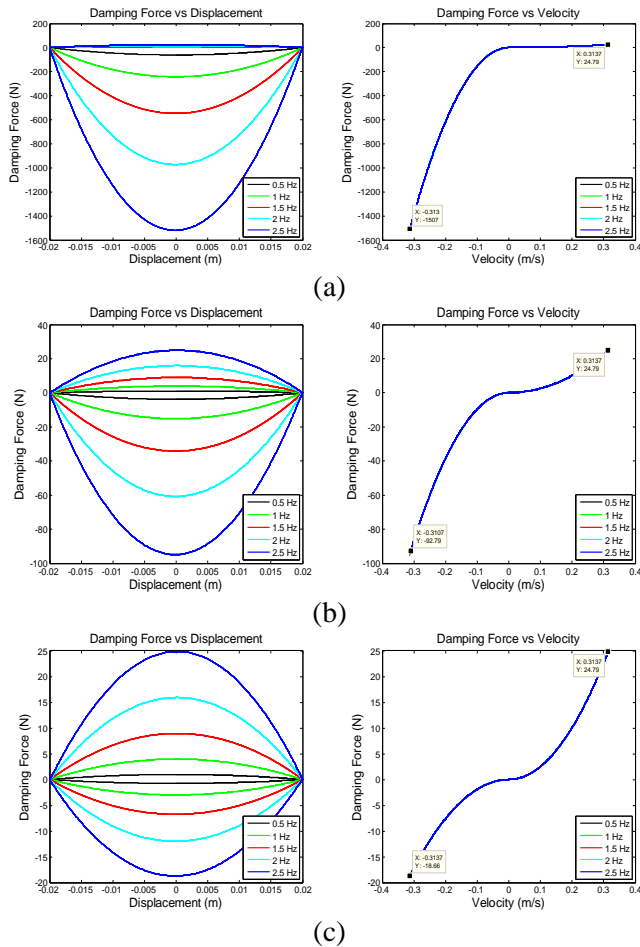


(b)

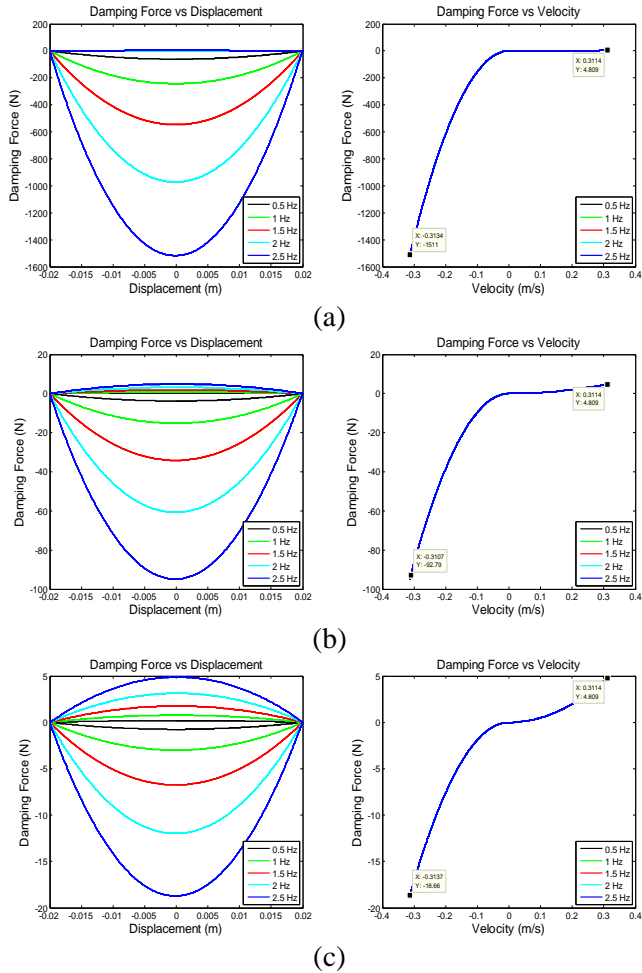


(c)

Gambar 5.5 Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 2 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm



Gambar 5.6 Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm



Gambar 5.7 Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan pada Silinder Hidrolik pasangan 3 cm dan 1.8 cm dengan pasangan diameter orifice 1 konstan sebesar 6 mm dan diameter orifice 2 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Tabel 5.3 Hasil Simulasi pada Silinder Hidrolik Pasangan
Diameter 3-1.8

| Diameter Orifice 1 | Diameter Orifice 2 | Frekuensi (Hz) | Gaya Redam Ekspansi (N) | Gaya Redam Kompresi (N) |
|--------------------|--------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| 2 mm | 2 mm | 0.5 | 17.63 | 57.8 |
| | | 1 | 65.08 | 230.9 |
| | | 1.5 | 146.5 | 536 |
| | | 2 | 257.6 | 959.7 |
| | | 2.5 | 398.1 | 1511 |
| 4 mm | 4 mm | 0.5 | 0.946 | 3.611 |
| | | 1 | 3.78 | 13.77 |
| | | 1.5 | 8.776 | 33.49 |
| | | 2 | 15.71 | 59.96 |
| | | 2.5 | 24.79 | 92.79 |
| 6 mm | 6 mm | 0.5 | 0.1863 | 0.7124 |
| | | 1 | 0.745 | 3.06 |
| | | 1.5 | 1.082 | 6.607 |
| | | 2 | 3.094 | 11.81 |
| | | 2.5 | 4.809 | 18.66 |

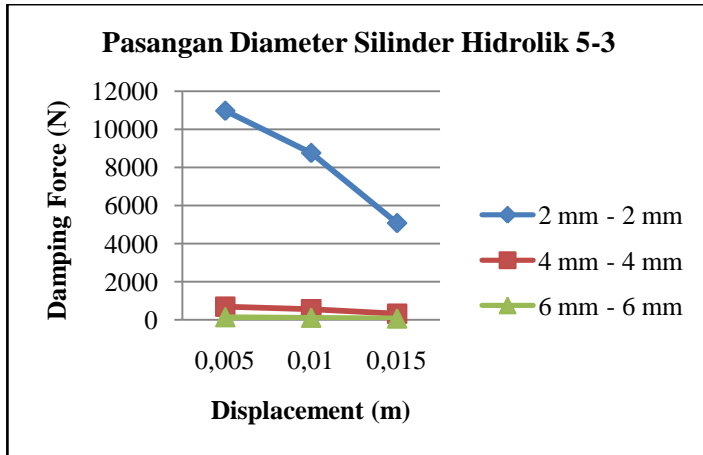
Dari tabel diatas, terlihat bahwa nilai gaya redam yang dihasilkan lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai gaya redam pada silinder hidrolik pasangan diameter 5-3 cm. Hal ini dikarenakan nilai diameter silinder hidrolik berbanding lurus dengan nilai gaya redam, sehingga semakin kecil diameter silinder hidroliknya maka semakin kecil pula gaya redam yang dihasilkan. Tabel tersebut berlaku pula untuk diameter orifice 1 dan orifice 2 yang berbeda. Misalnya nilai gaya redam maksimum untuk frekuensi 1.5 Hz pada diameter orifice 1 sebesar 6 mm dan diameter orifice 2 sebesar 2 mm didapatkan hasil sebesar 1.082 N dan 536 N. Karena hasilnya yang terlampau kecil, maka pasangan diameter silinder hidrolik 3-1.8 tidak disimulasikan pada *quarter car model* dengan massa *sprung* kendaraan truk.

Adapun untuk kesimpulan dari hasil simulasi baik pada pasangan diameter silinder hidrolik 5-3 maupun 3-1.8 dapat ditunjukkan pada tabel 5.4 dan gambar 5.8. Data pada tabel 5.4 di bawah ini diambil dari salah satu contoh simulasi yang telah dilakukan, dimana frekuensi yang dipilih yaitu 1.5 Hz dan gaya redam yang dipilih adalah gaya redam kompresi.

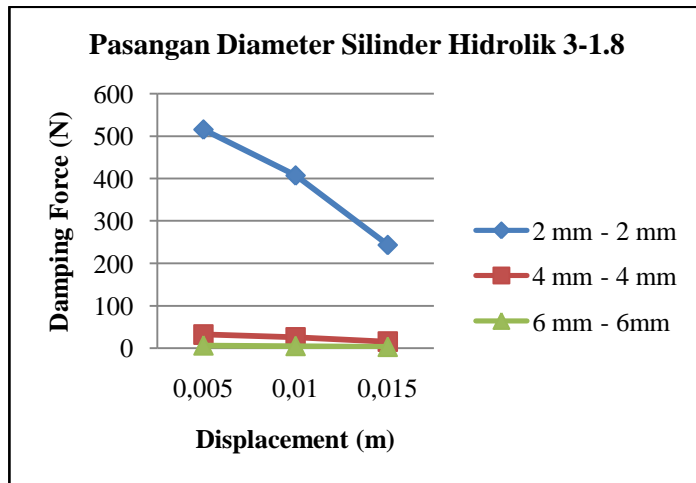
Tabel 5.4 Hasil Simulasi pada Silinder Hidrolik dengan Frekuensi 1.5 Hz

| Ukuran Diameter Orifice 1&2 | Perpindahan (m) | Gaya Redam (N) | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| | | Pasangan Diameter Silinder Hidrolik 5-3 | Pasangan Diameter Silinder Hidrolik 3-1.8 |
| 2 mm & 2mm | 0.005 | 10980 | 515.7 |
| | 0.01 | 8762 | 407.3 |
| | 0.015 | 5070 | 243.4 |
| 4 mm & 4 mm | 0.005 | 687.6 | 32.2 |
| | 0.01 | 551.6 | 25.45 |
| | 0.015 | 319.6 | 15.31 |
| 6 mm & 6 mm | 0.005 | 136.4 | 6.347 |
| | 0.01 | 107.8 | 5.02 |
| | 0.015 | 64.38 | 2.979 |

Sedangkan pada gambar 5.8 di bawah ini merupakan grafik representatif dari data pada tabel 5.4. Dari grafik ini akan diketahui hubungan antara ukuran diameter orifice 1 maupun 2, perpindahan dan pasangan diameter silinder hidrolik.



(a)



(b)

Gambar 5.8 Grafik Gaya Redam vs Perpindahan pada Pasangan Diameter Silinder Hidrolik (a) 5 cm dan 3 cm (b) 3 cm dan 1.8 cm

Dari grafik tersebut, diperoleh pengaruh perpindahan pada gaya redam suatu silinder hidrolik, yaitu semakin besar perpindahan maka semakin kecil nilai gaya redam dengan diikuti nilai diameter orifice yang semakin besar. Hal tersebut juga berlaku pada pasangan diameter silinder hidrolik 3 cm dan 1.8 cm dengan nilai gaya redam yang lebih kecil daripada pasangan diameter 5 cm dan 3 cm. Sehingga didapatkan kesimpulan pula bahwa semakin kecil nilai diameter silinder hidrolik semakin kecil pula nilai gaya redam dengan diikuti nilai perpindahan yang semakin besar. Dengan demikian, besarnya gaya redam suatu silinder hidrolik dipengaruhi oleh besarnya diameter orifice, diameter silinder hidrolik yang terdiri dari diameter piston dan batang piston, serta frekuensi inputan.

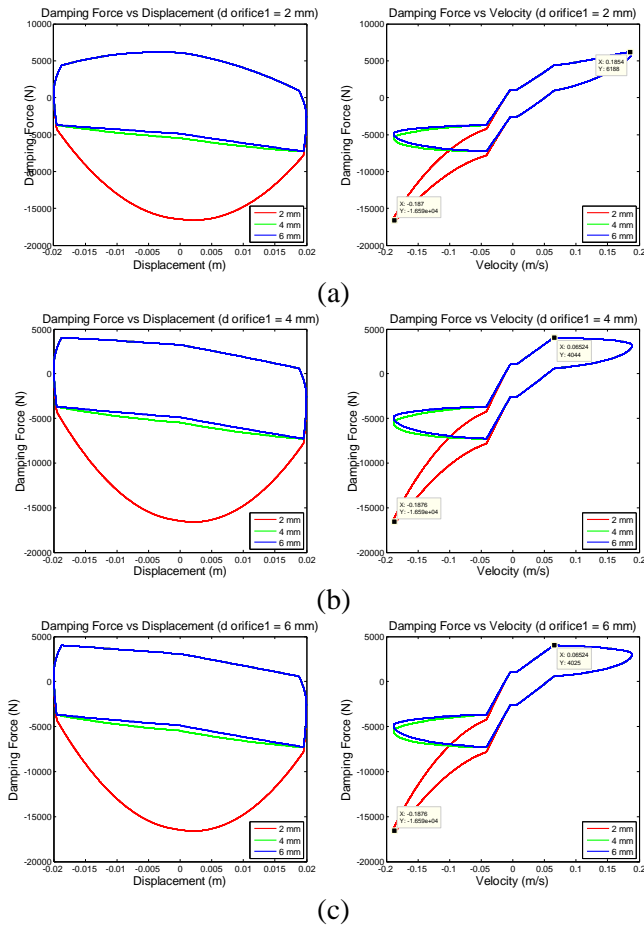
5.2 Gaya Redam dan Daya Listrik Bangkitan pada HMRSA

Simulasi ini dilakukan pada HMRSA dengan input sinusoidal (frekuensi 1.5 Hz), pasangan diameter silinder hidrolik 5 cm dan 3 cm serta variasi diameter orifice 2, 4, dan 6 mm. Gambar di bawah merupakan hasil simulasi yang terdiri dari grafik respon gaya redam serta grafik arus, tegangan dan daya listrik terhadap perpindahan dan kecepatan bodi kendaraan.

5.2.1 Grafik Respon Gaya Redam terhadap Perpindahan dan Kecepatan HMRSA Variasi Luasan Orifice

Gambar 5.9 merupakan grafik hasil simulasi pada HMRSA dengan diameter orifice 1 konstan dan diameter orifice 2 yang bervariasi. Diameter orifice 1 konstan dapat ditunjukkan dengan adanya satu warna garis saja pada grafik yang terletak di bagian atas (berwarna biru), baik itu untuk grafik respon gaya redam terhadap perpindahan maupun kecepatan.

Adapun bentuk bulat dari grafik respon gaya redam terhadap perpindahan menunjukkan besarnya luasan energi yang dapat diredam oleh HMRSA. Sedangkan histerisis yang ditunjukkan pada grafik respon gaya redam terhadap kecepatan muncul karena adanya inersia *gear* yang diperhitungkan.



Gambar 5.9 Grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan pada HMRSA variasi diameter orifice 2 dengan diameter orifice 1 sebesar (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Histerisis *looping* pada grafik tersebut menunjukkan energi yang hilang per satuan volume per siklus karena adanya redaman. Terlihat pula bahwa besarnya gaya redam maksimum

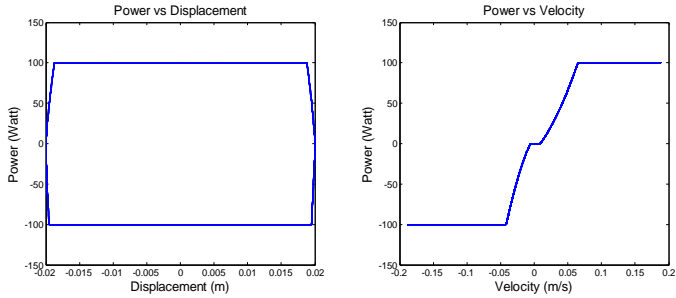
pada diameter orifice sebesar 2 mm sangat jauh jika dibandingkan dengan diameter orifice sebesar 4 mm dan 6 mm. Hal tersebut dikarenakan ukuran diameter 2 mm terlampau kecil sehingga tekanan yang dihasilkan akan semakin besar dan menyebabkan gaya redam juga semakin besar.

Dari hasil grafik tersebut, HM RSA yang akan diaplikasikan pada *quarter car* memiliki gaya redam yang sesuai dengan kebutuhan kendaraan truk, yaitu berkisar antara 1800 N hingga 20000 N. Pada saat ekspansi, HM RSA dengan diameter orifice 1 konstan sebesar 2 mm dapat menghasilkan gaya redam maksimum sebesar 6188 N, diameter orifice 1 konstan sebesar 4 mm menghasilkan gaya redam maksimum sebesar 4044 N, dan diameter orifice 1 konstan sebesar 6 mm menghasilkan gaya redam maksimum 4025 N. Ketiganya menghasilkan gaya redam maksimum yang sama pada saat kompresi, yaitu sebesar 16590 N dengan nilai diameter orifice 2 yaitu 2 mm. Untuk hasil simulasi selengkapnya, dapat dilihat pada tabel berikut.

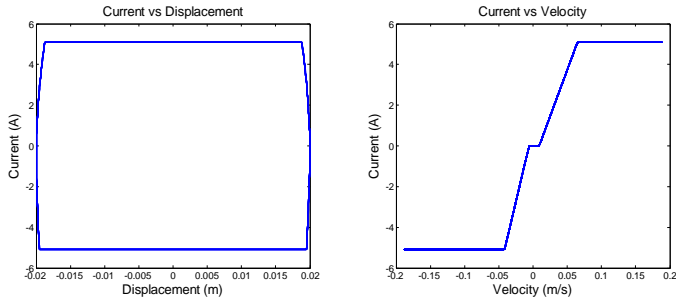
Tabel 5.5 Hasil Simulasi Grafik Respon Gaya Redam pada Variasi Diameter Orifice

| Pasangan Diameter Silinder Hidrolik | Diameter Orifice 1 | Gaya Redam Maksimum (Ekspansi) | Diameter Orifice 2 | Gaya Redam Maksimum (Kompresi) |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| D = 5 cm d = 3 cm | 2 mm | 6188 N | 2 mm | 16590 N |
| | 4 mm | 4044 N | 4 mm | 7295 N |
| | 6 mm | 4025 N | 6 mm | 7266 N |

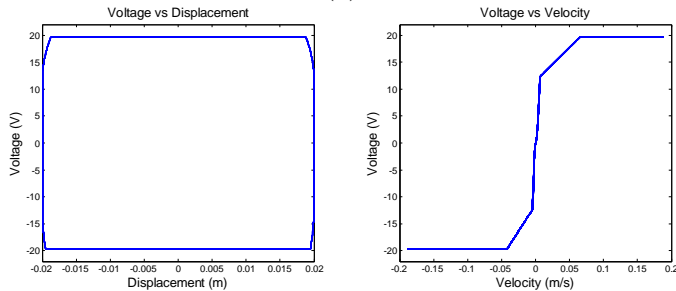
5.2.2 Grafik Arus, Tegangan dan Daya Listrik Bangkitan terhadap Perpindahan dan Kecepatan HM RSA Variasi Luasan Orifice



(a)



(b)



(c)

Gambar 5.10 Respon kelistrikan terhadap perpindahan dan kecepatan pada generator meliputi respon (a) Daya Listrik Bangkitan (b) Arus Listrik (c) Tegangan Listrik

Pada sistem HMRSA, perlu diketahui respon generator agar dapat dianalisis energi listrik yang dihasilkan. Gambar di atas merupakan hasil simulasi yang terdiri dari grafik daya listrik bangkitan, arus, dan tegangan listrik terhadap waktu. Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan *trendline* grafik yang relatif sama antara ketiga respon.

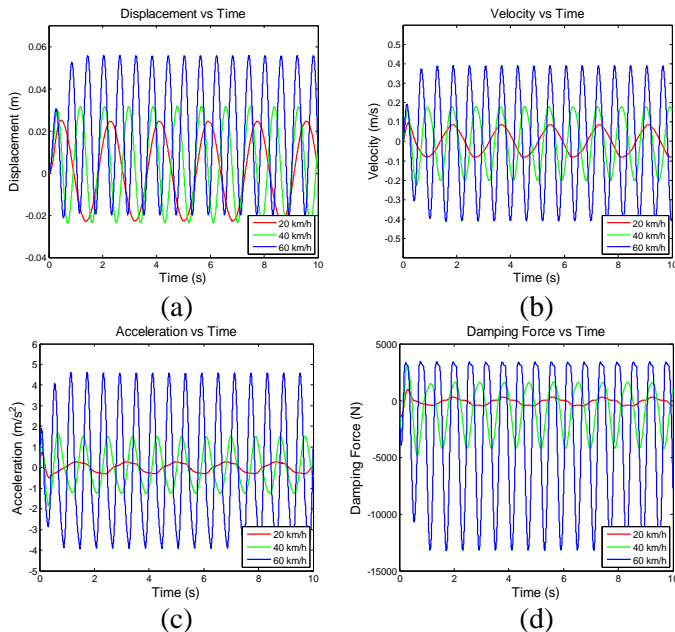
Daya listrik bangkitan maksimal yang dihasilkan HMRSA yaitu sebesar 100 Watt. Hal ini disebabkan generator yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 100 Watt, sehingga sistem tidak dapat menghasilkan lebih dari nilai tersebut. Sedangkan arus listrik yang dihasilkan sebesar 5 A dan tegangan listrik yang dihasilkan sebesar 19.6 Volt.

5.3 Respon Dinamis dan Daya Listrik Bangkitan dari Aplikasi HMRSA di *Quarter Car*

Simulasi ini dilakukan pada HMRSA dengan pasangan diameter silinder hidrolik 5 cm dan 3 cm, serta diameter orifice 1 sebesar 4 mm dan diameter orifice 2 sebesar 2 mm. Gambar di bawah merupakan grafik respon perpindahan, kecepatan, percepatan, maupun gaya redam pada HMRSA yang telah diaplikasikan pada *quarter car model*.

5.3.1 Grafik Respon Dinamis pada Bodi Kendaraan Akibat Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan

Dibawah ini merupakan grafik respon dinamis pada bodi kendaraan yang dipasang dengan HMRSA dengan variasi kecepatan kendaraan sebesar 20 km/jam, 40 km/jam dan 60 km/jam. Dari keempat grafik dapat dilihat bahwa respon perpindahan, kecepatan, percepatan dan gaya redam memiliki *trend* yang sama, yaitu semakin besar kecepatan kendaraan, maka nilai keempat respon tersebut juga semakin besar. Masing-masing juga menunjukkan bahwa sistem sudah dalam keadaan *steady* ketika detik pertama.



Gambar 5.11 Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal variasi kecepatan kendaraan terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redam

Fenomena lainnya yang dapat dilihat pada grafik yaitu semakin besar frekuensi ataupun kecepatan kendaraan, maka gelombang yang dihasilkan akan semakin banyak dan memiliki kerapatan yang cukup besar. Dengan osilasi yang semakin banyak, dapat dikatakan bahwa kendaraan semakin tidak bagus/nyaman karena getaran semakin dapat dirasakan. Dengan kata lain, semakin kecil dan sedikit osilasi yang terjadi, maka semakin baik/semakin nyaman suatu kendaraan.

Adapun perbedaan hasil grafik harmonik antara ekspansi dan kompresi pada respon perpindahan disebabkan karena perbedaan diameter orifice yang digunakan, yaitu 4 mm pada proses ekspansi dan 2 mm. Seperti telah dijelaskan sebelumnya yaitu semakin kecil diameter orifice maka semakin kecil pula

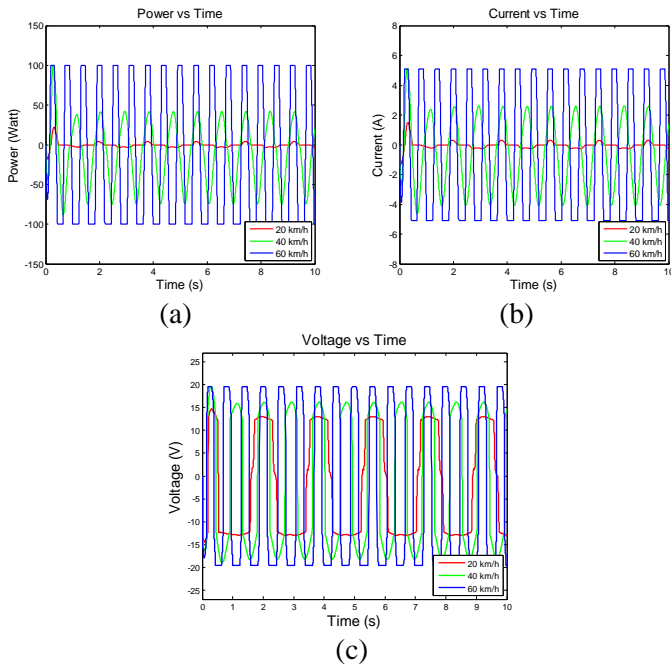
perpindahannya diikuti dengan semakin besar gaya redam yang dihasilkan. Pada pemberian input sinusoidal 20 km/jam, didapatkan hasil bahwa respon perpindahan maksimum sebesar 0.02 m, kecepatan maksimum sebesar 0.08 m/s, percepatan maksimum sebesar 0.3 m/s^2 , dan gaya redam maksimum sebesar 311.7 N saat ekspansi dan 457.5 saat kompresi. Pada pemberian input sinusoidal 40 km/jam, nilai perpindahan maksimum saat ekspansi dan kompresi sebesar 0.03 m dan 0.02 m, kecepatan maksimum sebesar 0.17 m/s dan 0.2 m/s, percepatan maksimum sebesar 1.7 m/s^2 dan 1.2 m/s^2 , dan gaya redam maksimum sebesar 1493 N saat dan 4787 N. Pada pemberian input sinusoidal 60 km/jam, nilai perpindahan saat ekspansi dan kompresi maksimum sebesar 0.05 m dan 0.01 m, kecepatan maksimum sebesar 0.4 m/s, percepatan maksimum sebesar 4.5 m/s^2 dan 3.9 m/s^2 , dan gaya redam maksimum sebesar 3414 N dan 13170 N.

5.3.2 Grafik Respon Kelistrikan pada Generator Akibat Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada HMRSA berupa grafik respon kelistrikan yaitu respon arus, voltase/tegangan, dan daya listrik yang dapat dibangkitkan. Dapat dilihat pada gambar 5.12 bahwa ketiga respon kelistrikan memiliki *trend* yang sama, yaitu semakin besar kecepatan kendaraan maka semakin besar respon arus, tegangan, dan daya listriknya. Selain itu, semakin besar arus dan tegangan yang dihasilkan maka akan semakin besar daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Hal tersebut telah sesuai dengan persamaan dalam mencari daya listrik sebagai berikut.

$$P = V.I \quad (5.1)$$

Untuk daya dan arus listrik yang terjadi pada kecepatan kendaraan 20 km/jam adalah mendekati 0 dikarenakan frekuensi untuk kecepatan kendaraan tersebut hanya sebesar 0.55 Hz.



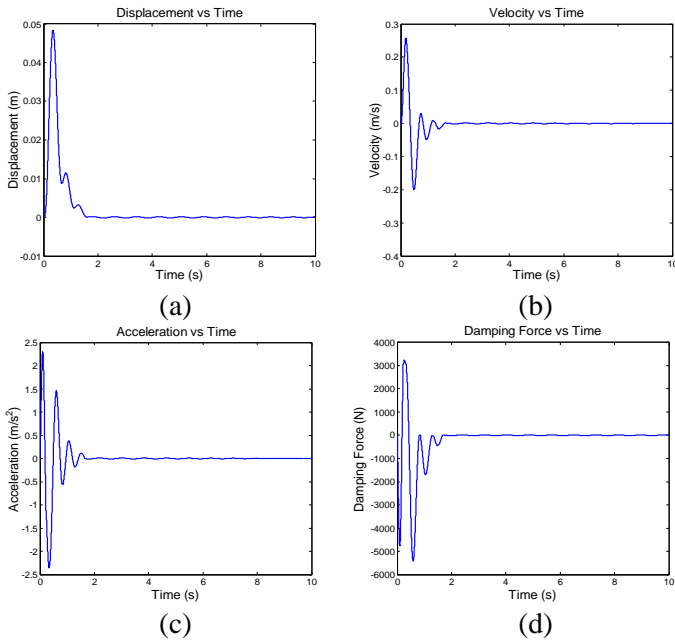
Gambar 5.12 Respon kelistrikan generator akibat input sinusoidal variasi kecepatan kendaraan meliputi respon (a) Daya Listrik Bangkitan (b) Arus Listrik (c) Tegangan Listrik

Dari grafik tersebut dapat diketahui pula nilai daya yang dihasilkan yaitu pada 20 km/jam menghasilkan 22 Watt hanya sekitar 0.3 detik, lalu steady pada daya 0 Watt. Pada kecepatan 40 km/jam, nilai daya sebesar 38 Watt saat ekspansi dan 88 Watt saat kompresi. Sedangkan pada kecepatan 60 km/jam, baik saat ekspansi dan kompresi menghasilkan 100 Watt. Adapun arus yang dihasilkan pada kecepatan 20 km/jam yaitu sebesar 1.5 A dengan waktu hanya sekitar 0.3 detik lalu *steady* di arus 0 A, pada kecepatan 40 km/jam yaitu sebesar 2.4 A saat ekspansi dan 4.1 A saat kompresi, serta pada kecepatan 60 km/jam sebesar 5 A. Sedangkan tegangan yang dihasilkan pada kecepatan 20 km/jam yaitu sebesar 13 Volt, kecepatan 40 km/jam sebesar 16.2 Volt saat

ekspansi dan 18.3 Volt saat kompresi, serta kecepatan 60 km/jam sebesar 20 Volt pada kondisi *steady*.

5.3.3 Grafik Respon Dinamis pada Bodi Kendaraan Akibat Input Bump yang Dimodifikasi

Grafik di bawah ini terdiri dari grafik respon perpindahan, kecepatan, percepatan, dan gaya redam terhadap waktu.



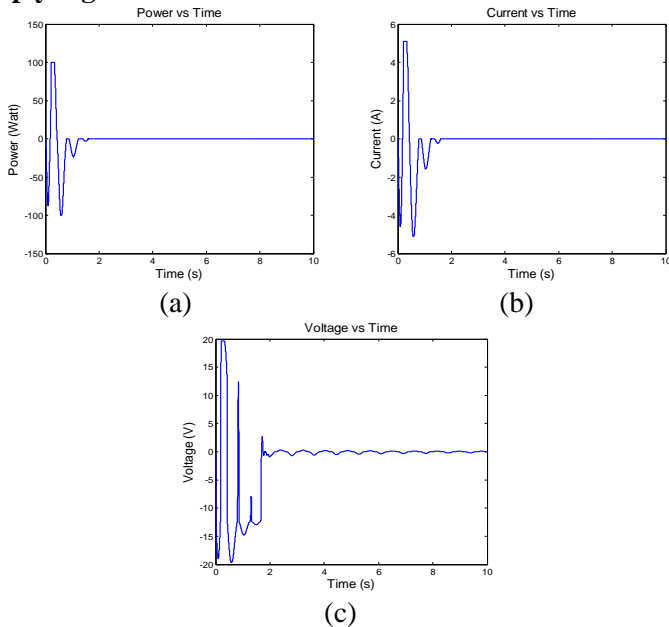
Gambar 5.13 Respon bodi kendaraan akibat input bump modifikasi terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redam

Dari keempat grafik, terlihat bahwa gerak respon pada kendaraan memiliki *trendline* yang sama. Pada saat awal simulasi, grafik meningkat drastis kemudian menurun seiring berjalannya waktu. Grafik ini menunjukkan adanya respon

transien pada sistem *quarter car* dengan HMRSA. Hal tersebut disebabkan karena kendaraan diberi input bump yang dimodifikasi dan adanya faktor redaman.

Selain itu, dapat dilihat bahwa sistem mengalami kestabilan pada detik ke 2 baik itu pada respon perpindahan, kecepatan, percepatan, dan gaya redam. Respon perpindahan bodi kendaraan di awal adalah sebesar 0.048 m dengan waktu 0.3 s, kemudian dilanjutkan dengan respon kecepatan di awal sebesar 0.25 m/s dengan waktu 0.18 s. Untuk respon percepatan di awal adalah sebesar 2.3 m/s^2 pada detik ke 0.1 s, dan respon gaya redam di awal sebesar 3239 N dengan waktu 0.26 s.

5.3.4 Grafik Respon Kelistrikan Generator Akibat Input Bump yang Dimodifikasi



Gambar 5.14 Respon kelistrikan generator akibat input bump yang dimodifikasi meliputi respon (a) Daya Listrik Bangkitan (b) Arus (c) Tegangan terhadap waktu

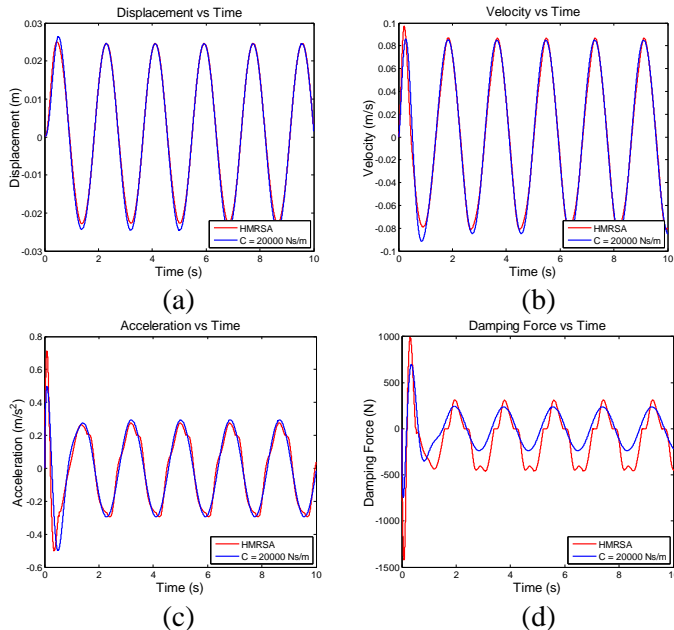
Ketiga grafik tersebut menunjukkan bahwa respon kelistrikan pada kendaraan memiliki *trendline* yang sama. Pada saat awal simulasi, grafik meningkat drastis kemudian menurun hingga mencapai kestabilan. Kestabilan dicapai pada waktu 1.6 detik baik pada respon daya listrik bangkitan, arus, dan tegangan. Respon daya listrik bangkitan di awal adalah sebesar 100 Watt dengan interval waktu 0.1 s, kemudian dilanjutkan dengan respon arus listrik di awal sebesar 5 A dengan interval waktu 0.1 s. Sedangkan untuk respon tegangan di awal adalah sebesar 19.6 Volt dengan interval waktu yang sama.

5.4 Perbandingan Respon Dinamis antara C Konvensional dengan HMRSA pada *Quarter Car*

Pada sistem HMRSA ini, perlu diketahui perbandingan nilai respon perpindahan, kecepatan, percepatan, maupun gaya redam yang terjadi antara kendaraan yang dipasang HMRSA dengan sebuah redaman bernilai konstanta redaman tertentu (C). Hal ini dilakukan supaya dapat diketahui seberapa besar perbedaan kedua sistem dan juga pengaruh adanya sistem *Regenerative Shock Absorber* (RSA) terhadap gerak respon bodi kendaraan.

5.4.1 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Sinusoidal dengan Kecepatan Kendaraan 20 km/jam

Gambar 5.14 menunjukkan hasil simulasi antara kendaraan yang dipasang dengan HMRSA dan redaman dengan konstanta $C = 20000 \text{ Ns/m}$ menggunakan input sinusoidal (kecepatan kendaraan sebesar 20 km/jam).



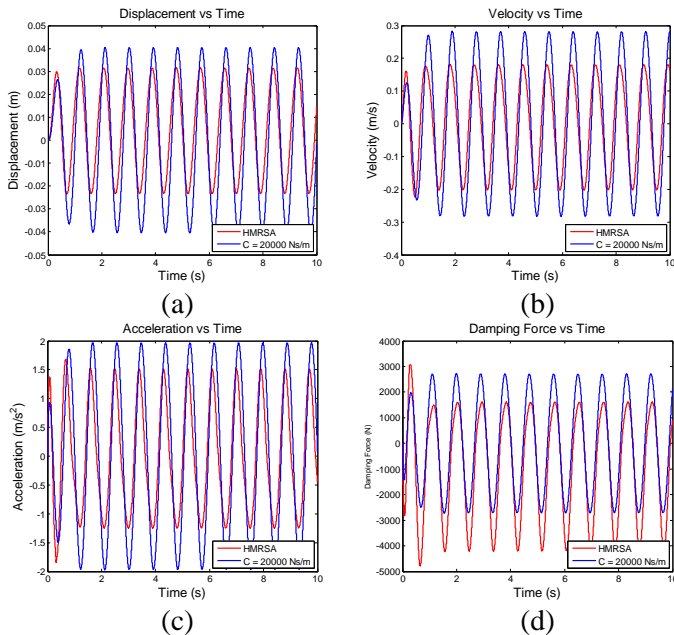
Gambar 5.15 Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redam

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup signifikan antara grafik respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap waktu simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa nilai rata-rata konstanta redaman pada HMRSA mendekati nilai 20000 Ns/m untuk kecepatan kendaraan sebesar 20 km/jam (frekuensi 0.55 Hz). Namun, perbedaan dapat terlihat dari grafik gaya redam terhadap waktu, dimana pada saat awal simulasi nilai gaya redam untuk HMRSA sebesar 991.6 saat ekspansi dan 1421 saat kompresi. Sedangkan untuk C konvensional, besarnya 697 N saat ekspansi dan 743.2 saat kompresi. Kedua sistem mencapai kestabilan yang relatif sama yaitu pada detik ke 2, masing-masing sebesar 458 N saat

ekspansi dan 316 N saat kompresi untuk HMRSA serta 244 N saat ekspansi dan 316 N saat kompresi.

5.4.2 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Sinusoidal dengan Kecepatan Kendaraan 40 km/jam

Berikut merupakan hasil simulasi antara kendaraan yang dipasang dengan HMRSA dan C konvensional dengan input sinusoidal (kecepatan kendaraan sebesar 40 km/jam).

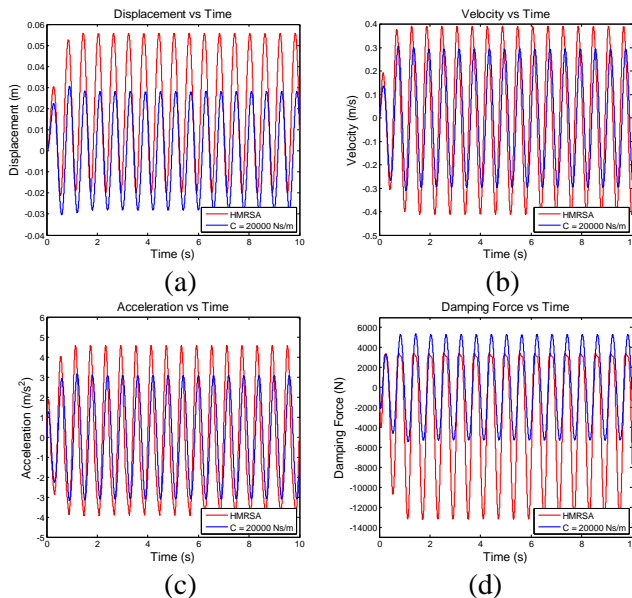


Gambar 5.16 Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal dengan kecepatan kendaraan 40 km/jam terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redam

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa hanya terdapat sedikit perbedaan antara grafik respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap waktu simulasi. Masing-masing grafik memiliki perbedaan nilai yang relatif sama yaitu sekitar ± 0.1 .

Sistem *quarter car* dengan konstanta redaman $C = 20000 \text{ Ns/m}$ memiliki respon perpindahan 0.1 m , kecepatan 0.1 m/s , dan percepatan 0.1 m/s^2 lebih besar daripada HMRSA. Sedangkan pada grafik respon gaya redam terhadap waktu, *quarter car* dengan HMRSA memiliki gaya redam lebih besar saat kompresi dan lebih kecil saat ekspansi daripada C konvensional ketika sistem telah mencapai keadaan *steady*. Nilai gaya redam kendaraan dengan HMRSA adalah sebesar 1494 N saat ekspansi dan 4232 N saat kompresi. Sedangkan nilai gaya redam kendaraan dengan konstanta redaman C adalah sebesar 2724 N saat ekspansi dan 2730 N saat kompresi.

5.4.3 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Sinusoidal dengan Kecepatan Kendaraan 60 km/jam



Gambar 5.17 Respon bodi kendaraan akibat input sinusoidal dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redam

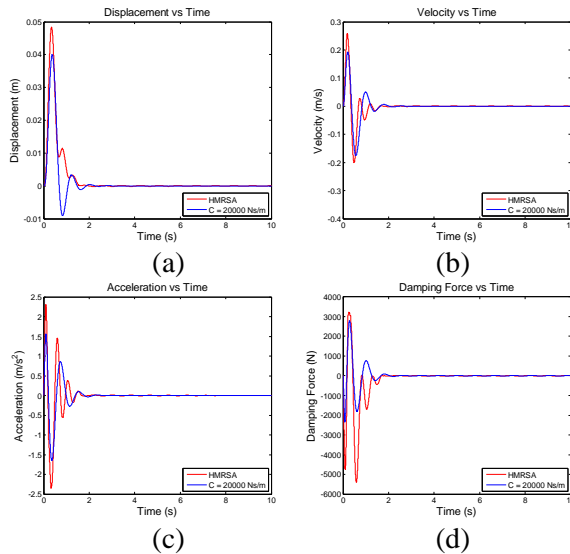
Grafik di atas merupakan hasil simulasi antara kendaraan yang dipasang dengan HMRSA dan C konvensional dengan input sinusoidal (kecepatan kendaraan sebesar 60 km/jam).

Gambar 5.16 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara grafik respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap waktu simulasi. Contohnya, kendaraan yang dipasang dengan HMRSA memiliki perpindahan sebesar 0.056 m, kecepatan sebesar 0.39 m/s, percepatan sebesar 4.58 m/s^2 saat ekspansi. Sedangkan konstanta redaman C memiliki perpindahan sebesar 0.028 m, kecepatan sebesar 0.29 m/s, dan percepatan sebesar 3.18 m/s^2 saat ekspansi. Perbedaan cukup besar juga dapat dilihat pada grafik respon gaya redam, dimana saat kompresi, nilai gaya redam HMRSA mencapai 13250 N. Hal tersebut cukup jauh dibandingkan dengan nilai gaya redam konstanta redaman C sebesar 5325 N.

5.4.4 Grafik Respon Dinamis Akibat Input Bump yang Dimodifikasi

Di bawah ini adalah hasil simulasi antara kendaraan yang dipasang dengan HMRSA dan konstanta redaman C dengan input bump yang dimodifikasi.

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa pada *trendline* grafik secara keseluruhan, grafik meningkat selama beberapa detik saja kemudian berosilasi hingga sistem stabil. Keempat grafik tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hanya saja sistem rata-rata berosilasi sebanyak 3 kali ketika dipasang dengan *shock absorber* berkonstanta C dan berosilasi sebanyak 4 kali dengan HMRSA hingga sistem *steady*. Perbedaan cukup signifikan terletak pada grafik respon gaya redam terhadap waktu dimana gaya redam kompresi pada HMRSA bernilai lebih besar yaitu 5500 N jika dibandingkan dengan konstanta redaman C yang hanya sebesar 1500 N. Sedangkan untuk *settling time* sistem dari keempat grafik adalah sebesar 2 detik.

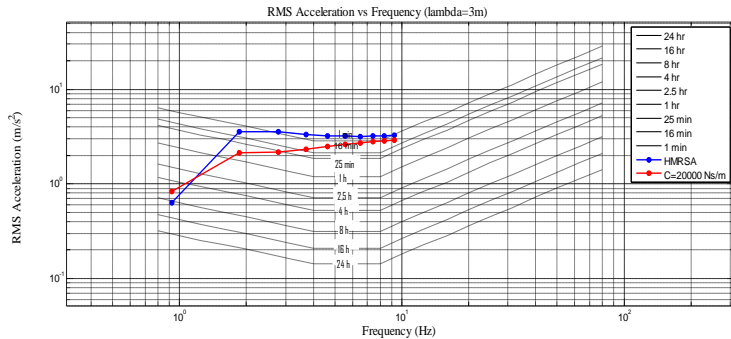


Gambar 5.18 Respon bodi kendaraan akibat input bump yang dimodifikasi terhadap (a) Perpindahan (b) Kecepatan (c) Percepatan (d) Gaya Redam

5.5 Grafik RMS (*Root Mean Square*)

5.5.1 Grafik RMS Percepatan Bodi Kendaraan pada Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan

Gambar di bawah ini menunjukkan grafik respon percepatan RMS (*Root Mean Square*) terhadap frekuensi dengan asumsi lamda 10 meter. Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan 0-100 km/jam dengan interval 10 km/jam. Dari kecepatan tersebut, akan diperoleh nilai frekuensi dengan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$ untuk dijadikan inputan berupa sinusoidal. Setelah itu, nilai percepatan RMS yang telah disimulasikan akan diplot pada grafik ISO 2631. Dari grafik ini, dapat dilihat berapa lama ketahanan pengemudi saat berkendara menurut ISO 2631 untuk setiap frekuensi kendaraan.



Gambar 5.19 Respon Percepatan RMS Bodi Kendaraan Akibat Input Sinusoidal

Dapat dilihat pada grafik bahwa ketika *quarter car* dipasang HMRSA, untuk kecepatan 10 km/jam dapat bertahan hingga 8 jam. Namun pada kecepatan 20 km/jam ketahanan pengendara hanya selama 16 menit dan berkurang hingga 1 menit pada kecepatan 30-100 km/jam. Sedangkan pada *quarter car* dengan konstanta redaman $C=20000$ Ns/m, untuk kecepatan 10 km/jam, pengendara dapat bertahan kurang dari 8 jam. Kemudian untuk kecepatan 20 km/jam adalah kurang dari 1 jam, 30 km/jam selama 25 menit, dan untuk kecepatan 40 km/jam adalah selama 16 menit. Sedangkan untuk kecepatan 50-70 km/jam pengendara dapat bertahan kurang dari 16 menit dan pada kecepatan 80-100 km/jam pengendara bertahan selama 1 menit saja.

5.5.2 Grafik *Displacement Transmissibility* pada Input Sinusoidal Variasi Kecepatan Kendaraan

Tabel 5.3 merupakan data tabel simulasi yang dilakukan pada sistem *quarter car* dan HMRSA. Tabel 5.4 merupakan data tabel simulasi yang dilakukan pada sistem *quarter car* dengan konstanta redaman C . Keduanya dilakukan pada variasi kecepatan kendaraan 0-100 km/jam. Kedua sistem ini disimulasikan menggunakan asumsi $\lambda = 3$ m.

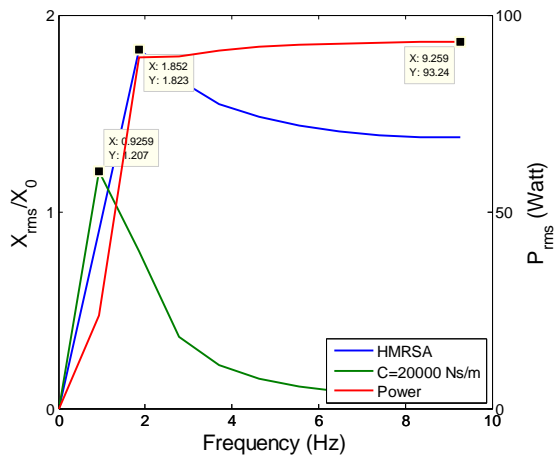
Tabel 5.6 Data Simulasi *Quarter Car* dan HMRSA Variasi Kecepatan Kendaraan

| No | Velocity (km/h) | X_{RMS} (m) | X_0 (m) | X_{RMS} / X_0 | Freq (Hz) | A_{RMS} (m/s ²) |
|----|-----------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 0.0181 | 0.02 | 0.905 | 0.926 | 0.6325 |
| 2 | 20 | 0.0365 | 0.02 | 1.823 | 1.852 | 3.5490 |
| 3 | 30 | 0.0384 | 0.02 | 1.92 | 2.778 | 3.5494 |
| 4 | 40 | 0.0309 | 0.02 | 1.545 | 3.704 | 3.3129 |
| 5 | 50 | 0.0297 | 0.02 | 1.485 | 4.63 | 3.2318 |
| 6 | 60 | 0.0288 | 0.02 | 1.44 | 5.556 | 3.1928 |
| 7 | 70 | 0.0281 | 0.02 | 1.405 | 6.481 | 3.1893 |
| 8 | 80 | 0.0277 | 0.02 | 1.385 | 7.407 | 3.2003 |
| 9 | 90 | 0.0275 | 0.02 | 1.375 | 8.333 | 3.2319 |
| 10 | 100 | 0.0275 | 0.02 | 1.375 | 9.259 | 3.2696 |

Tabel 5.7 Data Simulasi *Quarter Car* dan Konstanta Redaman C Variasi Kecepatan Kendaraan

| No | Velocity (km/h) | X_{RMS} (m) | X_0 (m) | X_{RMS} / X_0 | Freq (Hz) | A_{RMS} (m/s ²) |
|----|-----------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 0.0241 | 0.02 | 1.207 | 0.926 | 0.8306 |
| 2 | 20 | 0.0160 | 0.02 | 0.8 | 1.852 | 2.1423 |
| 3 | 30 | 0.0072 | 0.02 | 0.36 | 2.778 | 2.1596 |
| 4 | 40 | 0.0044 | 0.02 | 0.22 | 3.704 | 2.3129 |
| 5 | 50 | 0.0030 | 0.02 | 0.15 | 4.63 | 2.4783 |
| 6 | 60 | 0.0022 | 0.02 | 0.11 | 5.556 | 2.6097 |
| 7 | 70 | 0.0017 | 0.02 | 0.085 | 6.481 | 2.7206 |
| 8 | 80 | 0.0014 | 0.02 | 0.07 | 7.407 | 2.8024 |
| 9 | 90 | 0.0011 | 0.02 | 0.055 | 8.333 | 2.8719 |
| 10 | 100 | 0.0009 | 0.02 | 0.045 | 9.259 | 2.9227 |

Dari kedua data di atas, didapatkan grafik seperti pada gambar 5.19. Di bawah ini merupakan grafik X_{RMS}/X_0 terhadap variasi frekuensi dari kecepatan kendaraan, dimana X_{RMS} menunjukkan respon perpindahan RMS bodi kendaraan dan X_0 menunjukkan amplitudo yang digunakan. Nilai RMS sendiri merupakan nilai efektif dari nilai yang divariasikan, dimana setiap kecepatan kendaraan yang divariasikan akan memiliki nilai X_{RMS}/X_0 yang bervariasi pula. Sebagai tambahan, ditunjukkan pula nilai RMS dari daya yang dihasilkan sehingga dapat dilihat pada grafik dan sumbu y berwarna merah berikut.



Gambar 5.20 Grafik Perbandingan *Displacement Transmissibility* antara *Quarter Car* dengan HMRSA dan konstanta redaman C

Grafik tersebut menunjukkan perbandingan grafik *displacement transmissibility* antara HMRSA dan konstanta redaman C dengan variasi kecepatan 0-100 km/jam serta seberapa besar daya yang dihasilkan. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa antara HMRSA dengan konstanta redaman C memiliki karakteristik grafik yang sama, yaitu dari titik (0,0) kemudian membentuk titik puncak dan selanjutnya grafik menurun seiring dengan bertambahnya frekuensi. Titik tertinggi/titik puncak dari

grafik berwarna biru (HM RSA) ada pada X_{RMS}/X_0 dengan nilai 1.823, yaitu pada frekuensi sebesar 1.852 Hz. Sedangkan dari grafik berwarna merah (C konvensional), titik tertinggi terletak pada $X_{RMS}/X_0 = 1.207$, yaitu pada frekuensi sebesar 0.926 Hz.

Dari grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa kendaraan dengan nilai konstanta redaman sebesar 20000 Ns/m lebih baik daripada kendaraan yang dipasang menggunakan HM RSA dikarenakan nilai *displacement transmissibility*-nya lebih rendah, dan hal tersebut menunjukkan bahwa input perpindahan (amplitudo) tidak jauh berbeda dengan output perpindahan (X_{rms}). Namun di sisi lain, kendaraan dengan HM RSA memiliki keuntungan karena dapat menghasilkan daya listrik, sedangkan untuk konstanta redaman C tidak dapat menghasilkan daya listrik. Adapun daya maksimum yang dapat dibangkitkan adalah sebesar 93.24 Watt.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada silinder hidrolik pasangan 5 cm dan 3 cm maupun pasangan 3 cm dan 1.8 cm, semakin besar frekuensi input sinusoidal maka semakin besar gaya redam yang dihasilkan.
2. Untuk respon dinamis pada HMRSA, simulasi dengan diameter orifice 1 sebesar 2 mm dan diameter orifice sebesar 2 mm dapat menghasilkan gaya redam terbesar yaitu 6188 N saat ekspansi dan 16590 N saat kompresi.
3. Luasan orifice sangat berpengaruh pada nilai gaya redam yang dihasilkan pada HMRSA. Semakin kecil dimensi orifice yang digunakan, semakin besar gaya redam yang dihasilkan.
4. Untuk respon kelistrikan pada HMRSA, daya listrik bangkitan maksimal yaitu sebesar 100 Watt. Sedangkan arus dan tegangan listrik maksimal yang dihasilkan sebesar 5 A dan 19.6 Volt.
5. Luasan orifice tidak berpengaruh pada nilai respon kelistrikan generator, baik itu arus, tegangan, maupun daya listrik bangkitan.
6. Dari pemberian input sinusoidal 20 km/jam pada *quarter car* dengan HMRSA didapatkan hasil bahwa nilai maksimum dari respon perpindahan sebesar 0.02 m, kecepatan sebesar 0.08 m/s, percepatan sebesar 0.3 m/s^2 , dan gaya redam maksimum sebesar 457.5 N. Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan sebesar 22 Watt, arus listrik sebesar 1.5 A, serta tegangan listrik sebesar 13 Volt.
7. Dari pemberian input sinusoidal 40 km/jam, respon dinamis yang didapat yaitu nilai maksimum dari

perpindahan sebesar 0.03 m, kecepatan sebesar 0.2 m/s, percepatan sebesar 1.7 m/s^2 , dan gaya redam sebesar 4787 N. Untuk hasil respon kelistrikan maksimum yaitu daya sebesar 88 Watt, arus listrik sebesar 4.1 A, serta tegangan listrik sebesar 18.3 Volt.

8. Dari pemberian input sinusoidal 60 km/jam, nilai maksimum dari perpindahan sebesar 0.05 m, kecepatan sebesar 0.4 m/s, percepatan sebesar 4.5 m/s^2 , dan gaya redam sebesar 13170 N. Untuk respon daya listrik yang dihasilkan yaitu sebesar 100 Watt, arus listrik sebesar 5 A, dan tegangan listrik sebesar 20 Volt.
9. Pada pemberian input bump yang dimodifikasi, rata-rata keseluruhan respon mengalami osilasi sebanyak 3 kali. Untuk respon perpindahan maksimum adalah sebesar 0.048 m, kecepatan sebesar 0.25 m/s, percepatan sebesar 2.3 m/s^2 , dan gaya redam sebesar 3239 N. Sedangkan daya listrik bangkitan maksimum sebesar 100 Watt, arus listrik sebesar 5 A, dan tegangan listrik sebesar 19.6 Volt.
10. Dari grafik percepatan RMS, ketahanan pengendara baik itu pada *quarter car* yang dipasangkan dengan HMRSA dan konstanta redaman C memiliki waktu ≤ 8 jam untuk variasi kecepatan kendaraan 0-100 km/jam.
11. Kendaraan yang dipasang *shock absorber* dengan nilai C sebesar 20000 Ns/m lebih baik daripada HMRSA karena memiliki nilai *displacement transmissibility* lebih rendah yaitu 1.207 pada frekuensi 0.926 Hz. Sedangkan HMRSA sebesar 1.823 pada frekuensi 1.852 Hz, namun HMRSA dapat menghasilkan daya efektif maksimum sebesar 93.24 Watt.

6.2 Saran

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dan hasil yang didapatkan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba menguji respon HMRSA dengan model setengah kendaraan (*half car model*) maupun model kendaraan penuh (*full car model*) dengan massa kendaraan yang sama ataupun berbeda.
2. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba alternatif dimensi, jumlah pasangan, maupun jenis dari mekanisme *gear* yang digunakan.
3. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menganalisa kenyamanan dari kendaraan yang dipasang dengan HMRSA.
4. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk melakukan pengujian secara langsung pada sistem HMRSA yang sudah dimodelkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Craig, Kevin. *Automotive Suspension System*. http://staffweb.worc.ac.uk/DrC/Courses%202013-14/Comp%203252/JournalArticles/Session4/Automotive_Suspension_Systems.pdf
- [2] The official U.S. government for fuel economy <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>
- [3] Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) RI. <http://prokum.esdm.go.id/Publikasi/Outlook%20Energi%202014.pdf>
- [4] Massachutes Institute of Technology news <http://newsoffice.mit.edu/2009/shock-absorbers-0209>
- [5] Longxin, Zhen dkk. 2010. *Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber*. Yanshan University, China.
- [6] Zuo, Lei dkk. 2010. *Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorber: Design, Modeling, and Road Tests*. Stony Brook University, New York USA.
- [7] Fang, Zhigang dkk. 2013. *An Optimal Algorithm for Energy Recovery of Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber*. Wuhan University of Technology, China.
- [8] Zhang, Yuxin dkk. 2014. *Study of Novel Hydraulic Pumping Regenerative Suspension for Vehicles*. Journal of the Franklin Institute.
- [9] Anuar, Kaspul. 2014. *Rancang Bangun dan Studi Karakteristik Respon Getaran Sistem Suspensi dengan Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [10] Bayu Prabowo, Chardian. 2015. *Pengembangan dan Uji Karakteristik Dinamis dan Energi Bangkitan Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

- [11] Deanandya. 2014. *Pemodelan dan Analisis Respon Dinamis Regenerative Shock Absorber (RSA) Hidraulis Mekanis Elektromagnetik*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [12] Tansa Equipment Pvt. Ltd. <http://www.orificeplate.in/orifice.html>
- [13] IAM. <http://iamechatronics.com/notes/process-measurement/128-what-are-the-different-types-of-orifice-plates-and-state-their-uses->
- [14] Fox, Robert W. dkk. 2010. *Introduction to Fluid Mechanics Seventh Edition SI Version*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd: Asia.
- [15] Rao, Singiresu S. 2004. *Mechanical Vibration*. Prentice Hall PTR: Singapore.
- [16] Ghasemalizadeh, Omid dkk. 2014. *Semi-Active Suspension Control using Modern Methodology : A Comprehensive Comparison Study*. Michigan.
- [17] Setiawan, Listy Fazria. 2014. *Modelling and Analysis of the Influence of Asymmetrical Damper on the Ride Comfort of the Vehicle*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

LAMPIRAN

M-file pada Simulasi Simulink Matlab

```
%% PARAMETER
%% PARAMETER QUARTER CAR
Ms=2250;
Mus=200;
kw=500000;
cw=5000;
k=180000;
omega=sqrt(k/Ms);
Zmax=0.02;
lamda=3;
%% PARAMETER SILINDER HIDROLIK DAN ORIFICE
dof_1=0.002;
dof_2=0.004;
dof_3=0.006;
dof_4=0.003;
D1=0.05;
d1=0.03;
D2=0.03;
d2=0.018;
rho=860;
Aof_1=pi*(dof_1^2)/4;
Aof_2=pi*(dof_2^2)/4;
Aof_3=pi*(dof_3^2)/4;
Aof_4=pi*(dof_4^2)/4;
A11_1=(pi/4)*((D1^2)-(d1^2));
A12_1=(pi*(D1^2))/4;
A11_2=(pi/4)*((D2^2)-(d2^2));
A12_2=(pi*(D2^2))/4;
com1_1=(rho/2)*(((A12_1/Aof_1)^2)-1);
com2_1=(rho/2)*(((A12_1/Aof_2)^2)-1);
com3_1=(rho/2)*(((A12_1/Aof_3)^2)-1);
com4_1=(rho/2)*(((A12_1/Aof_4)^2)-1);
```

```

eks1_1=(rho/2)*(((A11_1/Aof_1)^2)-1);
eks2_1=(rho/2)*(((A11_1/Aof_2)^2)-1);
eks3_1=(rho/2)*(((A11_1/Aof_3)^2)-1);
eks4_1=(rho/2)*(((A11_1/Aof_4)^2)-1);
com1_2=(rho/2)*(((A12_2/Aof_1)^2)-1);
com2_2=(rho/2)*(((A12_2/Aof_2)^2)-1);
com3_2=(rho/2)*(((A12_2/Aof_3)^2)-1);
eks1_2=(rho/2)*(((A11_2/Aof_1)^2)-1);
eks2_2=(rho/2)*(((A11_2/Aof_2)^2)-1);
eks3_2=(rho/2)*(((A11_2/Aof_3)^2)-1);
viscos=0.00001;
L=1.75;
Dp=0.01;
%% PARAMETER MOTOR HIDROLIK
eff_v=0.88;
eff_m=0.9;
q=0.0000082/(2*pi);
%% PARAMETER GEAR
dg1=0.115;
dg2=0.045;
N=dg1/dg2;
mg1=0.3429;
mg2=0.0582;
J1=0.5*mg1*(dg1/2)^2;
J2=0.5*mg2*(dg2/2)^2;
%% PARAMETER GENERATOR
alfa1=7.26e-04;
alfa2=0.0061;
ALFA2=11.4822;
beta=0.004421052631579;
BETA=-0.815263157894737;
cte=9.1420e-04;
CTE=0.118846;
fil=1337;

```

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Surabaya, 30 Mei 1993. Merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Bhakti V Gresik, SD Muhammadiyah GKB Gresik (1999-2005), SMP Negeri 1 Gresik (2005-2008) dan SMA Negeri 1 Gresik (2008-2011). Setelah lulus SMA, penulis mengikuti SNMPTN tulis 2011 dan diterima di Jurusan Teknik Mesin, FTI, ITS Surabaya. Penulis terdaftar dengan NRP. 2111 100 076.

Di Jurusan Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Desain pada Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis sebagai bahasan Tugas Akhir. Selama masa kuliah penulis telah mengikuti berbagai macam seminar, pelatihan dan workshop mengenai berbagai macam ketrampilan untuk meningkatkan *soft skill*. Penulis juga aktif dalam kegiatan di dalam lingkungan kampus seperti menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM), panitia berbagai kegiatan di lingkungan jurusan maupun institut, asisten praktikum laboratorium desain, serta berpartisipasi dalam ajang perlombaan otomotif. Di luar lingkungan kampus, Penulis aktif berpartisipasi dalam kegiatan berbasis pendidikan dengan menjadi pengajar les privat.

Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada Penulis, silakan menyampaikan melalui email auliawardanii@gmail.com.